MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7177-PUD/38

INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA

André de Castro Milone
Carlos Alexandre Wuensche
Cláudia Vilega Rodrigues
Francisco José Jablonski
Hugo Vicente Capelato
José Williams Vilas-Boas
José Roberto Cecatto
Thyrso Villela Neto

INPE
São José dos Campos
2003

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Astrofísica
Av. dos Astronautas, 1758
12227-010 – São José dos Campos, SP
Tel.: (12) 3945-7200

Colaboração na redação: Ana Maria Zodi

Fotocópias e montagem: Gráfica do INPE

AGRADECIMENTOS:

Space Telescope Science Institute (STScI); National Space Science Data Center (NSSDC): como fontes de boa parte das figuras e tabelas utilizadas.

Setores de Comunicação Visual e Desenho do INPE: pela edição de algumas figuras.

APRESENTAÇÃO

A fascinação pelos mistérios do Universo faz parte da natureza humana desde o começo da civilização. Ao mesmo tempo em que admiramos a sua extensão e beleza, sentimos o desafio de conhecê-lo e o desejo de descobrir a sua conexão conosco. Ao investigarmos o Cosmo estamos também indagando sobre a nossa própria origem.

É bem possível que o homem tenha perscrutado o céu antes da terra, mares e rios, que estavam bem mais próximos.

O ciclo das estações, a luz e o calor do Sol durante o dia, o luar e as estrelas à noite, a necessidade de se orientar em seus percursos de um lugar a outro e de estabelecer uma cronologia para os acontecimentos foram motivos suficientes para o homem tentar equacionar o Universo.

A princípio o Universo conhecido se restringia ao Sol, à Lua e alguns planetas. Com o aperfeiçoamento dos instrumentos astronômicos, e a própria evolução das idéias, o conhecimento humano foi se expandindo e o Cosmo se revelando, de forma surpreendente e impressionante.

O sistema solar é hoje esmiuçado pelas sondas espaciais. Os modernos telescópios parecem nos conferir visão de super-homens. Do Sol, partimos para as demais estrelas que, aos bilhões, permeiam a nossa galáxia, a Via Láctea. Mesmo sem conseguir penetrá-las, a astronomia vem decifrando o seu interior, a sua formação e evolução, tão ligadas à nossa própria existência, pois somos fruto das estrelas.

As gigantescas nuvens interestelares descortinam-se com suas formas curiosas e gases fluorescentes, e revelam-se como berçários de estrelas. Indo mais adiante, notamos que o Universo se organiza em grupos de estrelas, galáxias, e em superaglomerados, intercalados por imensos vazios.

Até onde os instrumentos podem satisfazer a nossa curiosidade, avançamos no espaço e retrocedemos no tempo, em direção aos limites do Universo, que nos mostram a sua

infância e adolescência.

O conhecimento adquirido alimenta as respostas a algumas das indagações básicas do espírito humano: Como surgiu e se desenvolve este imenso teatro, no qual a matéria e a energia produzem espetáculos fantásticos, em contínua transformação?

Estamos em São José dos Campos, uma cidade do planeta Terra, onde os astrônomos do INPE, iguais a muitos em outros lugares, estão investigando os segredos do Universo. Fazem isso pela satisfação que o conhecimento produz. Mais profundamente, o fazem para ampliar os horizontes do nosso próprio mundo.

Este caderno reúne os tópicos abordados no Curso de Introdução à Astronomia e Astrofísica do INPE, iniciado em 1998 e programado para ocorrer anualmente ao final do primeiro semestre. É destinado principalmente à atualização de professores do ensino fundamental e médio, e a estudantes universitários vinculados a áreas relacionadas à astronomia.

O curso pretende traçar as linhas básicas do que a astronomia já conseguiu decifrar, delineando também um quadro da evolução das idéias e das técnicas utilizadas na pesquisa científica. Paralelamente, são mostrados os trabalhos que a Divisão de Astrofísica do INPE vem desenvolvendo.

Há ainda o propósito de apresentar uma visão desmitificada da ciência e do cientista, expondo as suas tentativas e incertezas no caminho do conhecimento. Finalizando, a última parte do curso enfoca a importância da ciência básica, como principal geradora de novas idéias e tecnologias.

Alguns subprodutos esperados são despertar uma possível vocação científica nos estudantes e motivar os educadores a introduzir novas formas de comunicar a ciência a seus alunos.

Para que os objetivos propostos sejam cumpridos satisfatoriamente, este trabalho deve ser constantemente revisado e, nesse sentido, todas as críticas e sugestões serão bem-vindas.

SUMÁRIO

Capítulo 1

A ASTRONOMIA NO DIA-A-DIA

André de Castro Milone*

* e-mail: milone@das.inpe.br

A ASTRONOMIA NO DIA-A-DIA

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.1 INTRODUÇÃO

É marcante o fascínio que as pessoas sentem pelo céu. Quem nunca admirou um pôr do Sol ou ficou impressionado com uma tempestade? Todavia, ainda hoje, os fenômenos celestes e atmosféricos que fazem parte de nosso cotidiano não são compreendidos por grande parte da humanidade. Inclusive, ainda ocorre a mitificação desses fenômenos naturais.

Este capítulo pretende, dentro de certas limitações, apresentar aos educadores e estudantes universitários uma introdução aos fenômenos celestes presentes no nosso dia-a-dia muito embora passem despercebidos pela maioria. Os fenômenos relacionados exclusivamente à dinâmica da atmosfera de nosso planeta não serão abordados. A influência da atmosfera terrestre na observação científica dos astros é enfocada no Capítulo 2.

1.2 NASCIMENTO DA ASTRONOMIA

Na época atual, é cada vez mais difícil admirar um céu noturno escuro e estrelado, principalmente para quem vive num centro urbano. A poluição luminosa da cidade ofusca o brilho da maioria dos astros. Além do mais, quem consegue reservar um intervalo de tempo para essa tarefa tendo que cumprir tantos compromissos profissionais, familiares e pessoais?

1.2.1 PRÉ-HISTÓRIA

Imagine-se agora em um passado muito remoto, mais precisamente na pré-história (de 100 mil anos atrás até cerca de 8 mil a.C.), quando o ser humano vivia em pequenos grupos nômades. A preocupação com a sobrevivência num ambiente natural e hostil era crucial. Caçar, pescar, procurar frutas e raízes, fugir de animais perigosos e abrigar-se das variações climáticas faziam parte do cotidiano do homem pré-histórico. O homem dessa época tinha que se adaptar à alternância do claro-escuro e à mudança das estações. Certamente, o Sol foi o primeiro astro a ser notado. As razões são óbvias: é o Sol que

proporciona a mais evidente alternância de claro-escuro da natureza (o dia e a noite) e que atua como a principal fonte de calor para nós. A Lua foi o segundo astro a ser percebido, visto que ilumina a escuridão da noite, principalmente em sua fase cheia. As estrelas devem ter sido notadas em seguida, como pontos brilhantes em contraste a um céu bastante escuro. Os outros cinco astros errantes (significado original da palavra planeta, de origem grega) visíveis a olho nu só foram notados, quando a observação do céu se tornou persistente noite após noite. Esse tipo de investigação da natureza já necessitava de um pouco mais de inteligência por parte de nossos ancestrais. Há desenhos rupestres (inscritos em rochas) que incluem figuras de astros. Tanto os astros, como os animais, as montanhas, as florestas, os desertos e a água eram tidos como divindades porque não eram inteiramente compreendidos.

1.2.2 MUNDO ANTIGO

Após a última glaciação, a agricultura e a domesticação de animais tornaram-se atividades importantes para a sobrevivência do homem em nosso planeta. Começaram a aparecer os primeiros vilarejos e povoados. As primeiras civilizações mais notáveis surgiram a partir de 5.500 anos atrás, em quatro regiões hidrográficas distintas do planeta: nas bacias dos rios Tigre e Eufrates (Mesopotâmia, região atual do Irã e Iraque), por volta do ano 3500 a.C., com os sumerianos; ao longo do rio Nilo (atual Egito) em torno de 3100 a.C.; nas margens do rio Indus (atual Índia) por volta de 2500 a.C.; e em torno do rio Amarelo (atual China) em cerca do ano 2000 a.C. As sociedades da Mesopotâmia, Indu e do Antigo Egito influenciaram umas às outras devido à proximidade entre elas, inclusive marcando o desenvolvimento de outras posteriores como a da Antiga Grécia.

O desenvolvimento da escrita e, posteriormente, o da matemática, foram essenciais para o crescimento cultural e científico das primeiras civilizações, inclusive no campo da Astronomia. Certamente, a Astronomia é uma das ciências mais antigas da Humanidade. Nas civilizações antigas, o homem ainda continuava a associar divindades aos fenômenos naturais (astronômicos ou não). Os homens pré-histórico e antigo buscavam encontrar explicações mitológicas para vários fenômenos celestes observados, entre os quais: os dias, as noites, os eclipses da Lua e do Sol, as fases da Lua, o deslocamento dos planetas por entre as estrelas, os cometas e as estrelas

cadentes. Além do mais, nossos antepassados buscavam associar os fenômenos celestes aos terrestres e vice-versa.

Das quatro civilizações citadas, a mais antiga é sem dúvida, aquela que surgiu na Mesopotâmia, reunindo várias cidades bem estruturadas nas bacias férteis dos rios Tigre e Eufrates. Uma das cidades-estado foi a Babilônia, cuja supremacia durou uns 300 anos. Os babilônios foram um dos primeiros povos a registrar a presença dos cinco planetas visíveis a olho nu (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno), certamente sob a influência cultural dos sumerianos. Os deuses, os heróis e os animais desse povo eram associados aos astros observados. Na mitologia babilônica, a água líquida era a Mãe da natureza e sustentadora da Terra. O céu era representado por uma cúpula azul feita de rocha onde as estrelas estavam incrustadas, sendo a mesma sustentada pelas altas montanhas terrestres. Os babilônios buscavam entender as vontades dos deuses observando os astros no céu, as quais se refletiam de algum modo nos fatos terrestres. Assim, a Astrologia e a Astronomia nascem juntas, como uma única forma de conhecimento. A palavra desastre significa, primordialmente, um fato que contraria os astros. Conceberam as primeiras constelações, que eram apenas representações de figuras de deuses, animais e objetos “desenhadas” pelas estrelas. As constelações do Zodíaco são um exemplo.

1.3 PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO

O homem começou a perceber o “caminhar” do tempo, que acontece em uma única direção e flui sem interrupção (conceitos de unidirecionalidade e continuidade do tempo clássico), por meio da observação de fenômenos naturais. São exemplos: o germinar e crescimento de uma planta, o desabrochar de uma flor, o crescimento de um animal doméstico, o envelhecimento de uma pessoa, o deslocamento do Sol no céu durante um dia, a mudança do aspecto da Lua ao longo de um mês, a mudança cíclica das estações do ano e, até mesmo, a alteração do aspecto do céu noturno ao longo de um ano.

As primeiras organizações sociais humanas precisavam medir a passagem do tempo em inúmeras atividades práticas, tais como: saber a época certa para plantar uma determinada cultura, antecipar as estações de cheia e vazante de um rio e conhecer as

datas das celebrações religiosas. Por incrível que pareça, a primeira marcação de tempo ocorreu para períodos longos (meses e anos) e não para intervalos curtos (dias e horas).

Os povos antigos necessitavam também conhecer o espaço geográfico local, com a finalidade de se deslocarem quando necessário (sempre com um rumo definido). Além do mais, quando a pesca, a caça e o comércio envolviam grandes distâncias, a necessidade de conhecer o caminho de ida-e-volta era óbvia.

O QUE SÃO CONSTELAÇÕES?

Uma constelação corresponde a uma mera configuração projetada no céu, formada por linhas imaginárias conectando estrelas brilhantes. É associada a um desenho que representa um objeto, herói ou deus da sociedade humana que a concebeu. O termo constelação vem do vocábulo latino *constellatio*, que significa reunião de astros, muito embora as estrelas de uma constelação não estejam fisicamente reunidas pela gravitação em função das enormes distâncias que as separam. As 48 constelações clássicas foram compiladas pelo grego Ptolomeu em 137 d.C., inclusive as zodiacais. Parte das constelações clássicas simboliza estórias e mitologias herdadas dos povos antigos da Mesopotâmia e Egito. Em 1929, a União Astronômica Internacional estabeleceu uma cartografia completa da esfera celeste contendo 88 constelações no total. As 40 outras, acrescentadas na era moderna, foram definidas principalmente na época das grandes navegações oceânicas. Elas simbolizam essencialmente animais pertencentes às novas terras “descobertas” pelos europeus, e objetos usados na navegação da época. A maioria das constelações “recentes” situa-se no hemisfério sul do céu.

O QUE É NAVEGAÇÃO CELESTE?

Um dos tipos mais antigos de orientação no espaço e no tempo, utilizados pelo homem para se movimentar pela superfície terrestre, é a navegação por meio da posição das estrelas no céu. A navegação celeste é mais comumente aplicada para navegações marítimas. A partir da observação da posição de determinadas estrelas com relação ao meridiano celeste local e ao horizonte, pode-se calcular a posição geográfica correta de um lugar.

1.3.1 ANO SOLAR E LUNAÇÃO

A observação sistemática do deslocamento do Sol no céu permitiu ao homem perceber dois fatos notáveis: (i) tanto o nascer do Sol como o pôr do Sol não ocorrem diariamente nos mesmos pontos do círculo do horizonte, (ii) a duração desse deslocamento é diferente dia após dia. O mais incrível foi notar que esses fatos ocorrem de forma cíclica, cujo período é denominado de ano solar ou trópico. O ano solar tem 365,2422 dias (365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46,08 segundos).

A observação persistente da mudança do aspecto da Lua fez notar que o intervalo de tempo entre duas fases iguais e consecutivas corresponde a 29,53059 dias. Esse período lunar é denominado de lunação (ou período sinódico da Lua). O conceito de mês surgiu desse fato astronômico. Muitas sociedades antigas utilizaram e algumas ainda adotam o ano lunar, que possui 12 meses lunares, ou seja, 354,36708 dias (354 dias, 8 h, 48 min e 35,71 s). Os povos árabes do oriente médio usam um calendário baseado no mês lunar. Já os judeus utilizam um calendário lunissolar. O mundo ocidental contemporâneo usa um calendário solar que sofreu influência do calendário lunar, isto é, adotamos um ano com 12 meses, originários das 12 lunações.

1.3.2 HISTÓRIA DOS CALENDÁRIOS OCIDENTAIS

Os primeiros calendários da Roma Antiga (750 a.C. - 476 d.C.) eram caracterizados a bel prazer pelos próprios imperadores vigentes, baseados inclusive em superstições. O calendário do imperador Rômulo (753-717 a.C.) apresentava 304 dias com 10 meses de duração variável e o calendário de Numa Pompilo (717-673 a.C.) possuía 355 dias divididos basicamente em 12 ou 13 meses (de 29 ou 31 dias). O calendário de Pompilo aplicava uma correção ao ano solar de modo mais satisfatório do que o de Rômulo, porém era ainda muito complicado. Os nomes dos meses adotados por nós são originários desses calendários romanos. O imperador Júlio César (100-44 a.C.) decidiu adotar um calendário solar com 365 dias dispostos em 12 meses, de modo que a cada quatro anos o ano teria 366 dias. O primeiro mês do calendário juliano passou a ser *Januarius* e o dia excedente era acrescentado ao mês *Februarius* dando origem ao nosso ano bissexto. Por curiosidade, o nome do sétimo mês do nosso calendário, Julho, vem de uma homenagem a esse imperador romano após sua morte. A palavra calendário

provém da nomenclatura latina usada pelos antigos romanos para a designação da primeira parte de um mês: *kalendae*. As outras duas partes de um mês eram denominadas de *nonas* e *idus*.

Apesar de todos os ajustes efetuados na Roma Antiga, o ano juliano tinha em média 365,25 dias (ou 365 dias e 6 horas), sendo ligeiramente diferente do ano solar. A correção referente aos anos bissextos a cada quatro anos não foi suficiente. Ao longo de muitos anos, a diferença tornava-se cada vez maior, acrescentando um dia extra a cada intervalo de 128 anos, aproximadamente. Somente em 1582, o papa Gregório XIII (1512-1586) estabeleceu uma reforma crucial ao calendário ocidental. Assim foi a reforma gregoriana: (i) suprimiu 10 dias acumulados, para que o início de cada estação ocorresse na época certa; (ii) eliminou a ocorrência de anos bissextos durante três anos seculares para cada período de 400 anos, de modo que o ano 1600 foi bissexto, os anos 1700, 1800 e 1900 não o foram, 2000 foi bissexto, 2100 não o será e assim sucessivamente (somente os anos seculares divisíveis por 400 são bissextos); (iii) a contagem dos dias do mês passou a ser caracterizada por números cardinais (1, 2, 3, ..., 31) e não mais pela ordenação de *kalendae*, *nonas* e *idus*.

No entanto, ainda assim, resta uma diferença residual entre o ano solar e o ano gregoriano, que causa o acréscimo de um dia para cada período de 3.333,3333... anos. Desta maneira, o ano 4000 não deverá ser bissexto.

Alguém poderia propor mais uma reforma ao nosso calendário, fazendo um ano composto por 13 meses de 28 dias, porém isto é bem improvável.

1.3.3 CALENDÁRIO VIGENTE

Um modo de entender o calendário ocidental atual (gregoriano modificado) é expressar a duração do ano solar por uma soma de dias inteiros e fracionários.

$$\mathbf{365{,}2422\ dias \cong 365 + 1/4 - 1/100 + 1/400 - 1/3.300\ dias}$$

O termo à esquerda da quase-igualdade representa a duração do ano solar. O lado direito é composto por cinco termos:

(a) o primeiro é a duração do ano padrão;

(b) a adição da fração 1/4 corresponde à soma de um dia a cada quatro anos (os anos bissextos, que ocorrem em anos divisíveis por 4);

(c) a subtração de 1/100 mostra a necessidade de não incluir um dia a cada 100 anos;

(d) a adição de 1/400 indica a necessidade da ocorrência de um ano bissexto a cada 400 anos;

(e) a última fração à direita diz que se deve suprimir a inclusão de um dia a cada 3.300 anos, aproximadamente.

De acordo com os itens (c) e (d), o ano 2000 foi bissexto, mas os anos 2100, 2200 e 2300 não o serão.

ORIGEM DA SEMANA

O vocábulo semana provém do latim *septmana*, que significa sete manhãs (usado na Roma Antiga). O conceito de semana de 7 dias originou-se da duração de cada período lunar marcante ou do culto diário aos sete astros errantes pelos babilônios. O domingo era dedicado ao Sol, segunda-feira à Lua, terça a Marte, quarta a Mercúrio, quinta a Júpiter, sexta a Vênus e sábado a Saturno. As nomeações dos dias da semana em várias línguas modernas (ex. espanhol, francês, inglês e alemão) originaram-se dos nomes em latim desses astros (*Solis*, *Lunae*, *Martis*, *Mercurie*, *Jovis*, *Veneris* e *Saturni* respectivamente). A língua portuguesa não seguiu essa denominação para os dias da semana porque sofreu influência do cristianismo. As comemorações da Páscoa Cristã originalmente duravam uma semana de orações. Os dias da Páscoa eram denominados *feriaes* em latim, significando feriados. O domingo era nomeado por *feria-prima*, a segunda-feira era *feria-segunda* e assim por diante. O sábado vem do vocábulo latino *Shabbath*, que correspondia ao dia de descanso dos hebreus. A denominação domingo usada pelos povos latinos origina-se da substituição de *feria-prima* (ou *dies Solis*) por *dominica* imposta pelo imperador Flávio Constantino (Roma antiga, 280-337 d.C.), a qual significa dia do Senhor, quando da sua conversão ao cristianismo.

DÉCADA, SÉCULO E MILÊNIO

Quando se deu o início da contagem dos anos no calendário ocidental atual e quando ocorre a mudança de década, século e milênio?

O calendário juliano adota a época da fundação de Roma (753 a.C.) para o início da contagem, e o calendário gregoriano, que é essencialmente cristão, considera o nascimento de Jesus Cristo. Contudo, parece que Cristo nasceu no ano 4 a.C. e não no ano 1 d.C. como se pensa. Além do mais, não existiu o ano 0 (zero), de modo que o primeiro período de 10 anos (uma década) começou no ano 1 terminando no ano 10, assim como o primeiro século que terminou no ano 100 e o primeiro milênio, que findou no ano 1000. Consequentemente, o século XXI e o 3° milênio começaram em 2001, e não em 2000, como muita gente pôde imaginar.

1.4 DIAS E NOITES

Muitas civilizações antigas elaboraram explicações míticas para o movimento do Sol no céu durante o dia, assim como seu reaparecimento após a escuridão da noite. Como exemplos, os antigos babilônios pensavam no deslocamento noturno do Sol por debaixo do solo que era a morada dos mortos e os antigos egípcios (3200 a.C.) imaginavam o transporte do Sol no céu (corpo da deusa *Nut*) por um barco que durante a noite percorria um rio subterrâneo. Na Grécia clássica (600 a.C.), muitos afirmavam que a Terra era imóvel de modo que o Sol, deus *Helius*, percorria o céu numa grande carruagem.

1.4.1 DIA SOLAR E DIA SIDERAL

No transcorrer de um dia, atualmente dividido em 24 horas, nossos ancestrais faziam poucas divisões: manhã, meio do dia, tarde, início da noite, meio da noite e fim da noite. A observação do deslocamento do Sol era adotada na parte clara do dia. O deslocamento das estrelas mais brilhantes era aplicado para a subdivisão da noite.

A primeira definição de dia veio da observação do Sol, que corresponde ao dia solar. Além do mais, por questões práticas, o homem sentiu a necessidade de criar uma

ordenação matemática para o dia/noite, visto que nós possuímos um relógio biológico interno, completamente adaptado ao ciclo diário do Sol. O dia solar corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano celeste do lugar, uma linha imaginária no céu que une os pontos cardeais norte e sul passando pelo zênite (ponto imaginário no céu diametralmente oposto ao centro da Terra). O dia solar é dividido por definição em 24 horas solares.

Uma outra referência astronômica para definir o dia é representada pelas estrelas. É o dia sideral. Corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma determinada estrela pelo meridiano celeste local. Por convenção, o dia sideral é dividido em 24 horas siderais.

O dia solar e o dia sideral são diferentes pela simples razão de que a Terra não é imóvel e sim translada ao redor do Sol. Qual é o mais curto? Pensemos juntos: enquanto a Terra gira em torno do seu eixo ela continua o seu deslocamento ao redor do Sol no mesmo sentido e para que o Sol volte a assumir a mesma posição no céu depois de uma rotação completa da Terra, serão gastos alguns minutos a mais. Portanto, o dia solar é mais longo do que o sideral, mas apenas em cerca de 3 min e 56 s.

1 dia solar = 24 horas (solares)

1 dia sideral ≅ 23 horas, 56 minutos e 4 segundos (solares)

Outra pergunta: Qual é, então, o tempo gasto pela Terra para dar um giro completo em torno de si mesma? O referencial mais adequado para se medir a rotação da Terra é dado pelas estrelas distantes e não pelo Sol. Devido às próprias distâncias das estrelas, que estão muito mais longe do que o Sol, suas posições no céu são praticamente constantes. Portanto, emprega-se o período sideral.

A noite é a parte do dia, de 24 h, quando o Sol está abaixo do plano do horizonte. Há várias definições de noite. A noite civil começa (e termina) quando o centro do disco solar situa-se a 6 graus abaixo do horizonte e a noite astronômica, quando o Sol está a 18 graus. Os dias civil e astronômico são os complementos respectivos dessas definições de noite. Durante a noite astronômica, o céu não sofre alteração em brilho

enquanto que no início e fim da noite civil há ainda claridade crepuscular. Entretanto, por todo este capítulo, definimos “dia claro” como sendo a parte do dia em que o Sol está acima do horizonte e noite como seu complemento.

MEIO-DIA SOLAR E GNÔMON ASTRONÔMICO

Quando o Sol cruza o meridiano celeste local, estamos na metade tanto do “dia claro” como do dia civil e do dia astronômico, o meio-dia solar. Diz-se que o Sol culminou, de modo que ele atinge sua altura máxima no céu, projetando a menor sombra de qualquer objeto. Se esse objeto for uma haste perpendicular a uma superfície horizontal plana (um gnômon astronômico), sua sombra mínima diária fica sempre alinhada paralelamente à direção norte-sul. O gnômon é o mais antigo instrumento de observação astronômica.

TEMPO ASTRONÔMICO E TEMPO ATÔMICO INTERNACIONAL

Até meados da década de 50, a unidade básica de tempo, o segundo, era definida pela Astronomia. Um segundo de tempo correspondia a cada uma das 86.400 partes do dia solar médio (1 segundo ≡ 1/86.400 de 24 horas solares médias). A partir de então, o segundo passou a ser definido como sendo o intervalo de tempo gasto por 9.192.631.770 ciclos de uma transição eletrônica hiperfina do átomo de Césio 133. Essa é a definição do segundo internacional, ou melhor, tempo atômico. Contudo, o padrão de tempo usado por nós é o tempo universal coordenado, que corresponde ao tempo atômico corrigido na origem, toda vez que a diferença com relação ao tempo astronômico ultrapassa um certo valor.

1.4.2 ESFERICIDADE E MOBILIDADE DA TERRA

A idéia de imobilidade da Terra perdurou por muito tempo, até por volta do Renascimento Europeu, com a primeira revolução científica liderada por Nicolau Copérnico (1473-1543), Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1642-1727). O conceito de esfericidade para o nosso planeta não era totalmente aceito nessa época, embora Aristóteles (600 a.C.) já o tivesse proposto, ao observar eclipses da Lua (a

sombra da Terra era sempre circular quando projetada na Lua), e Eratóstenes (240 a.C.) já tivesse calculado o raio terrestre. Com as grandes viagens de circunavegação, todos tiveram que aceitar tais idéias.

Eratóstenes notou que o Sol não ficava a uma mesma altura no céu, simultaneamente em duas cidades do Egito Antigo (Alexandria e Siena, atual Assuan), situadas aproximadamente no mesmo meridiano terrestre. Ele observou que ao meio-dia de um solstício de verão, enquanto o Sol iluminava o fundo de um poço artesiano em Siena, um gnômon projetava uma pequena sombra em Alexandria, como é mostrado na Figura 1.1. Bastaria, então, conhecer a distância entre as duas cidades e o ângulo de separação entre elas em relação ao centro da Terra. Este ângulo corresponde àquele formado pelo gnômon e o raio de luz vindo do Sol, cujo vértice é a própria extremidade superior do gnômon. Admitindo-se uma distância de 5.000 *stadias* (unidade de comprimento da época; 1 *stadia* ≅ 185 m), a estimativa de Eratóstenes para o diâmetro polar da Terra foi de 14.715 km, muito próximo do valor moderno de 12.718 km.

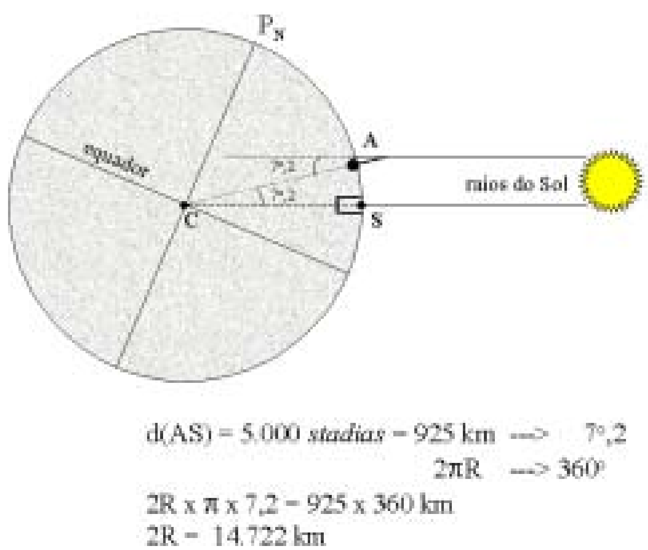


FIGURA 1.1 - MEDIÇÃO DO RAIO TERRESTRE POR ERATÓSTENES (240 A.C.). O PONTO A DESIGNA ALEXANDRIA, S, SIENA ONDE UM POÇO É ESQUEMATIZADO E C, O CENTRO DA TERRA. O RAIO POLAR DA TERRA É DESIGNADO POR R.

É fácil compreender a idéia de imobilidade da Terra, seja ela esférica ou não. Do ponto vista de uma pessoa sobre qualquer ponto da superfície terrestre exceto os pólos, observa-se que tanto o Sol como a maioria dos outros astros surgem no horizonte leste, elevam-se no céu e vão se esconder na parte oeste. Parece, então, que todo o céu está girando em torno de nós. Além do mais, quando jogamos qualquer objeto verticalmente para cima, ele sempre cai em queda livre no mesmo lugar de onde saiu (se não estiver ventando no momento); dando a impressão de que a Terra como um todo não se move como era concebido pela Física Aristotélica admitida até a revolução científica do Renascimento Europeu. Contudo, segundo a Física Newtoniana, o mesmo pode-se afirmar quando repetimos essa experiência dentro de um veículo em movimento retilíneo e uniforme, que em primeira aproximação pode representar o efeito do movimento de rotação da Terra num dado ponto de sua superfície. Foi notório o debate científico entre as idéias revolucionárias de Galileu e o paradigma científico daquela época, transformado em dogma pela Igreja Cristã. As leis de movimento elaboradas por Newton sustentaram a aceitação das idéias de Galileu: a Terra não está imóvel no centro do Universo, mas sim, gira em torno de si mesma e translada ao redor do Sol (leia a seção A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR do capítulo O SISTEMA SOLAR, para mais detalhes).

A rotação da Terra foi comprovada por medição direta não astronômica, em 1851, através do experimento do pêndulo de Léon Foucault (físico francês). Ele verificou que ao abandonar um pêndulo à ação da gravidade, o plano de oscilação do mesmo gira em torno da vertical do lugar.

1.4.3 ESFERA CELESTE E ROTAÇÃO DA TERRA

Qualquer pessoa ao observar o céu de um local descampado percebe que está no centro de um grande hemisfério celeste. Esse tipo de visualização do céu contribuiu para a concepção do geocentrismo. O céu na Astronomia é idealizado como uma grande esfera, a esfera ou abóbada celeste, que está centrada na Terra (visão geocêntrica: Figura 1.2).

O movimento dos astros no céu, ao longo de um dia ou uma noite, ocorre de leste para oeste. Dizemos que é um movimento aparente, porque não são os astros que se movem, mas sim a Terra que gira de oeste para leste. A Figura 1.2 mostra que a esfera celeste parece girar no sentido contrário ao da rotação da Terra.

A trajetória de um determinado astro durante seu movimento diário aparente ocorre paralelamente ao equador celeste, como visto na Figura 1.2. Esse círculo imaginário, que divide o céu em duas metades, nada mais é que uma projeção do equador terrestre na abóbada celeste.

A rotação da Terra define um eixo cujas interseções com a superfície terrestre são os pólos geográficos norte e sul (pontos imaginários). As linhas imaginárias sobre a superfície da Terra que unem os pólos são denominadas meridianos terrestres. Um plano perpendicular ao eixo de rotação, e eqüidistante de ambos os pólos, divide o globo em dois hemisférios, norte e sul. A interseção deste plano com a superfície da Terra define o equador terrestre. Os paralelos terrestres são os círculos imaginários paralelos ao equador.

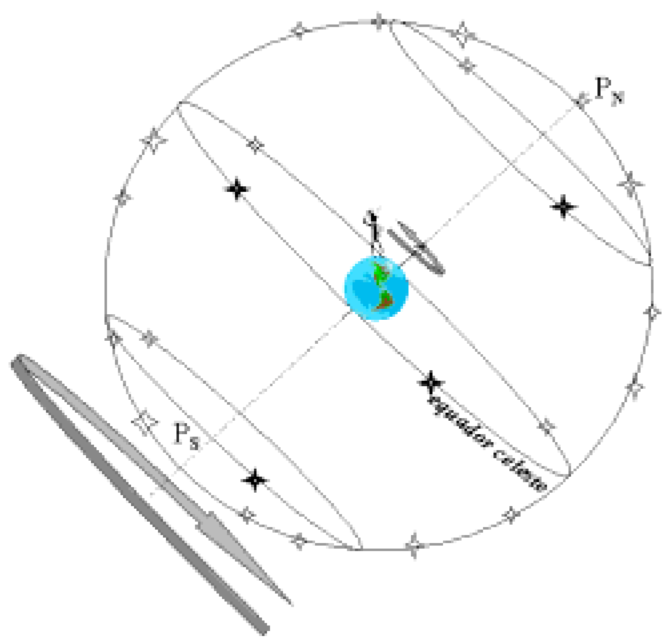


FIGURA 1.2 - A ESFERA CELESTE: UMA VISÃO GEOCÊNTRICA DO UNIVERSO.

Não “sentimos” a rotação da Terra porque a força centrífuga associada a ela é somente 3% da força de gravidade. Se a Terra passasse a girar cada vez mais rápido, chegaríamos ao ponto de ter gravidade zero, ou mesmo de sermos jogados para fora da superfície (de modo análogo a um carrossel). Contudo, a velocidade de rotação não é desprezível. No equador terrestre, a velocidade linear de rotação fica por volta de 1.670 km/h. Sobre o Trópico de Capricórnio (latitude aproximada de São José dos Campos), a velocidade de rotação é cerca de 1.500 km/h.

Da mesma forma que na Terra, existem na esfera celeste os pólos norte e sul, definidos como sendo as interseções imaginárias do eixo de rotação terrestre com o céu (veja a Figura 1.2).

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Para localizar uma cidade na Terra, precisamos de duas coordenadas: latitude e longitude. A latitude de um ponto qualquer sobre a superfície da Terra é o ângulo contado a partir do equador até esse ponto, ao longo do meridiano do lugar. A latitude vai de –90° (no pólo sul), 0° (no equador) até +90° (no pólo norte), por convenção. A longitude é o ângulo medido sobre o equador a partir de um meridiano de referência até o meridiano do lugar. O meridiano de referência do Sistema de Coordenadas Geográficas é aquele que passa pelo Observatório de Greenwich (Inglaterra). A longitude é medida em graus (°) ou em horas (h), indo de 0° no meridiano de Greenwich até +180° (ou +12 h), quando contamos no sentido oeste de Greenwich, e até -180° (ou –12 h), quando contamos para leste (é comum nomear como longitude leste ou oeste).

COORDENADAS CELESTES EQUATORIAIS

As coordenadas celestes equatoriais são definidas de maneira análoga às geográficas, sendo aplicadas à localização dos astros no céu. Precisamos, novamente, de duas coordenadas: declinação e ascensão reta. A declinação é contada a partir do equador celeste, usando-se a mesma convenção: de 0° a +90° para o norte e 0° a -90° para o sul. A ascensão reta é contada sobre o equador celeste, desde um ponto de referência até o meridiano do astro no sentido de oeste para leste, indo de 0 a 24 h. Esse ponto de referência é uma das interseções da eclíptica (projeção da órbita da Terra na esfera celeste) com o equador do céu, sendo denominado de Ponto Vernal ou Gama, marcando a passagem do Sol do hemisfério celeste sul para o norte.

REGRA DA MÃO DIREITA E SENTIDO DA ROTAÇÃO TERRESTRE

Com a finalidade de visualizar o movimento de rotação da Terra no espaço, basta aplicarmos a regra da mão direita. Dispõe-se a mão direita com o dedo polegar para cima, o qual representaria o pólo norte. O sentido da rotação terrestre é o mesmo daquele usado para o fechamento da mão (veja a Figura 1.2).

1.4.4 HORA SOLAR E FUSOS HORÁRIOS

O Sol culmina no céu sempre ao meio-dia solar. Porém, isto ocorre em tempos diferentes para cada meridiano terrestre, conforme a Terra vai girando em torno de si mesma. Enquanto em um determinado lugar o Sol está culminando, em outros o Sol já culminou ou ainda vai culminar. Do mesmo modo, enquanto em alguns lugares o Sol está surgindo no horizonte, em outros o Sol está se pondo. Portanto, a hora solar é local e é fornecida diretamente por um relógio solar.

Além disso, o Sol não se desloca com a mesma velocidade ao longo de sua trajetória anual aparente (ao redor da Terra). Para corrigir esse efeito, criou-se a hora solar média, a partir do movimento uniforme de um Sol fictício. A diferença entre a hora solar média e a hora solar verdadeira é definida como sendo a Equação do Tempo, e pode resultar em até 15 (quinze) minutos a mais ou a menos. A equação do tempo decorre do fato de que a velocidade da Terra em torno do Sol não é constante (translação numa órbita elíptica).

Um fuso horário corresponde a uma faixa de longitude terrestre com 15° (ou 1 h) de largura, na qual se adota a hora solar média do seu meridiano central como sendo sua única hora: a hora civil ou legal. O meridiano de origem (longitude = 0 h) dos fusos horários é aquele que passa pelo Observatório de Greenwich, adotado por questões históricas. A Figura 1.3 mostra os fusos horários adotados no mundo. O Brasil possui quatro fusos horários: o fuso de -2 horas para Fernando de Noronha e Ilhas Oceânicas, -3 horas para Brasília e a maioria dos estados, -4 horas para os estados de RO, RR, MS, MT, parte oeste do Pará e a parte leste do Amazonas e -5 horas para o Acre e o extremo oeste do Amazonas. O horário de Brasília está em atraso com relação aos europeus, e adiantado em relação aos dos EUA.

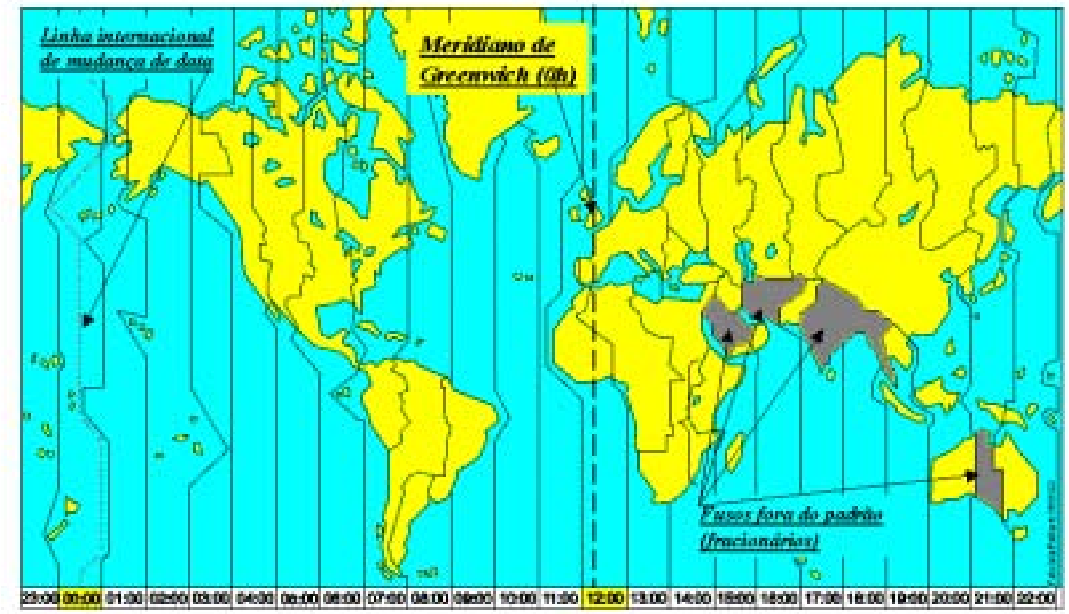


FIGURA 1.3 - FUSOS HORÁRIOS DA TERRA.

O QUE É HORÁRIO DE VERÃO?

O horário de verão é simplesmente a hora civil acrescida de uma ou mais unidades, com a finalidade de se aproveitar a claridade do começo e fim do dia civil, economizando assim energia elétrica. O início e o término do horário de verão estão condicionados à data do solstício de verão (22/12 para o hemisfério sul), quando a duração do “dia claro” é máxima. Na prática, o meio do período do horário de verão deve se situar próximo a essa data.

1.4.5 ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES

Quando nos deslocamos em latitude na Terra, podemos perceber que o aspecto do céu noturno vai mudando ligeiramente. Certas estrelas e constelações deixam de ser vistas e outras passam a ser avistadas por nós. O Sol também começa a mudar de trajetória diurna, fazendo com que a duração do dia civil aumente ou diminua.

Para uma pessoa que está exatamente sobre o equador da Terra (latitude 0° e longitude qualquer), ambos os hemisférios do céu podem ser observados por completo. Nesse caso singular, o plano do equador celeste está disposto perpendicularmente ao plano do horizonte, e é representado pelo círculo que cruza o zênite e une os pontos cardeais leste e oeste (Figura 1.4). No equador terrestre, as trajetórias diárias dos astros ocorrem em planos perpendiculares ao plano do horizonte, de modo que, diariamente, todos os astros ficam metade do tempo acima do horizonte e metade do tempo abaixo, como pode ser visualizado na Figura 1.4. Consequentemente, os "dias claros" e as noites tem a mesma duração de 12 horas, em média, ao longo de todo o ano. Os dias civis duram, em média, 12 h e 48 min (noites civis de 11 h e 12 min) e os dias astronômicos, 14 h e 24 min (noites astronômicas de 9 h e 36 min).

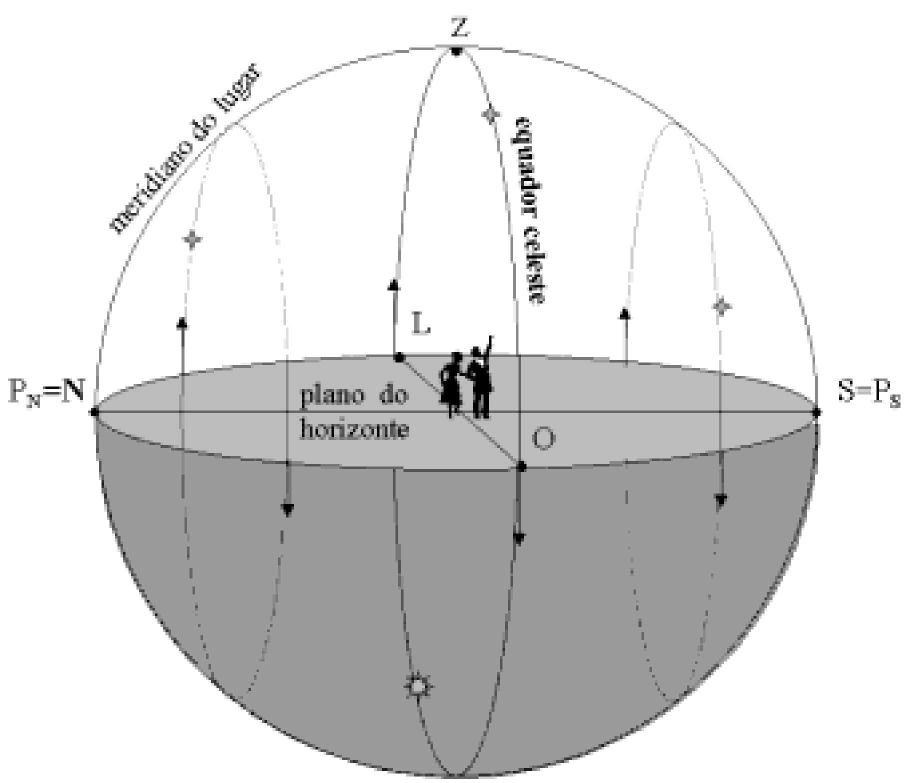


FIGURA 1.4 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO EQUADOR.

Se alguém se situar exatamente em um dos pólos de rotação da Terra (latitude +90° ou -90° e longitude indeterminada), a visão do céu será completamente diferente da anterior. Nessa situação extrema, o círculo do equador celeste coincide com o do horizonte e o pólo celeste respectivo com o zênite (Z). As trajetórias dos astros no céu ocorrem de modo paralelo ao plano do horizonte, como é visualizado na Figura 1.5. Somente um hemisfério celeste é observado. Se estivermos no pólo sul, avistaremos somente a metade sul do céu como é o caso da mesma figura. Os astros situados nesse hemisfério celeste nunca se "escondem" abaixo do plano do horizonte. Há noites de 24 horas (quando o Sol estiver abaixo do horizonte) e vice-versa no caso dos "dias claros", quando ocorre o chamado sol da meia-noite. Os dias civis são de 24 h durante toda a primavera local, todo o verão, início do outono e fim do inverno, de modo que as noites civis de 24 h ocorrerão no restante do ano. Os dias astronômicos abrangem períodos maiores do início do outono local e fim do inverno, além de toda a primavera e verão.

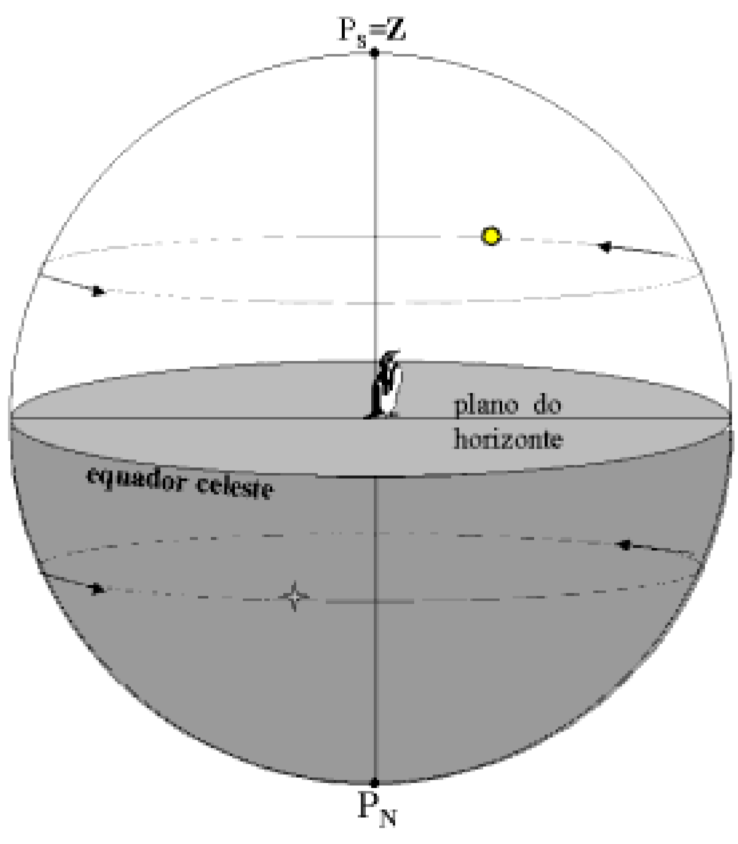


FIGURA 1.5 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DO PÓLO SUL.

No caso intermediário (Figura 1.6), se estivermos fora do equador ou de um dos pólos terrestres (como é o caso de São José dos Campos), perceberemos que as trajetórias aparentes diárias dos astros ocorrem em planos oblíquos ao plano do horizonte. O plano do equador celeste apresentar-se-á também com a mesma obliqüidade relativa ao horizonte. O pólo celeste, correspondente ao hemisfério onde a pessoa se situa, fica elevado no céu, e o outro, abaixo do horizonte. Os astros ficam uma parte do dia visíveis acima do plano do horizonte e a outra parte abaixo do mesmo, em períodos desiguais. Certos astros próximos do pólo celeste elevado ficam sempre acima do horizonte (aparentemente girando em torno desse pólo) e uma parte do céu próxima ao outro pólo celeste nunca é visível.

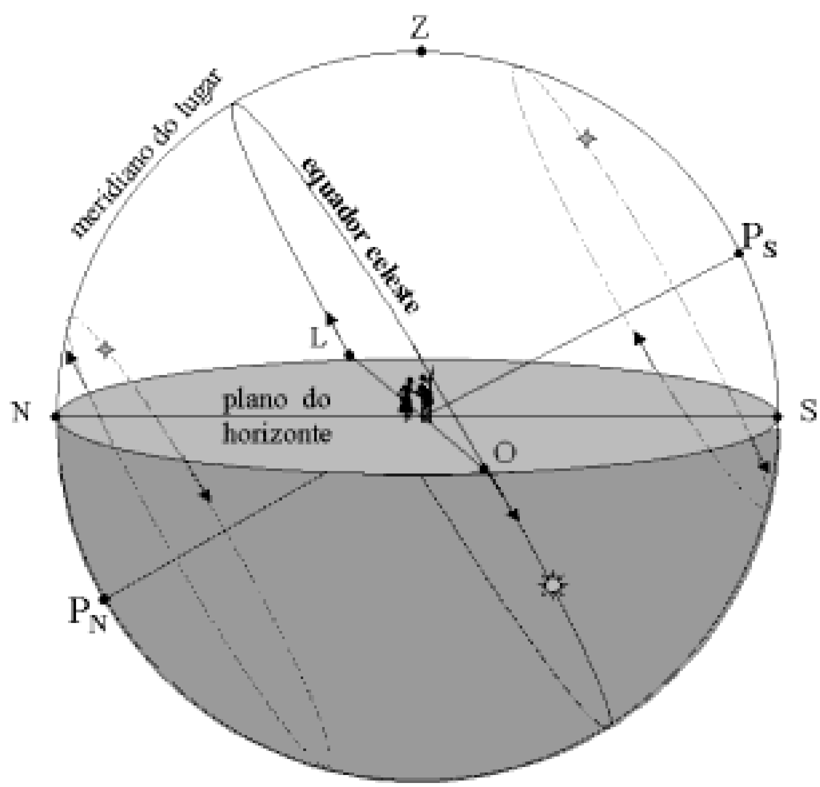


FIGURA 1.6 - VISÃO TOPOCÊNTRICA DA ESFERA CELESTE A PARTIR DE UM LOCAL ENTRE O EQUADOR E O PÓLO SUL.

O QUE É ZÊNITE?

O zênite nada mais é que o ponto imaginário no céu exatamente acima de nossa cabeça. Quando falamos que o Sol ou qualquer astro está a pino, ele está cruzando o zênite do lugar. Para determinarmos a direção do zênite, basta estendermos o fio de prumo (usado em construção civil), imaginando que o prolongamento desse fio interceptará a esfera celeste no zênite. O gnômon astronômico aponta simultaneamente para o zênite e para o centro da Terra.

1.5 ESTAÇÕES DO ANO

1.5.1 MOVIMENTO ANUAL DO SOL E ECLÍPTICA

Os primeiros astrônomos começaram a perceber que o Sol se movia lentamente contra o fundo do céu, definido pelas estrelas e constelações. Faziam isso observando as constelações que são vistas, na direção do poente, logo após o pôr do Sol (antes de se "porem") e aquelas que são ofuscadas pelo brilho solar um pouco antes do nascer do Sol na direção do nascente. Notaram que, gradualmente, as constelações situadas a leste do Sol deixam de ser vistas devido ao ofuscamento pela claridade solar e que as constelações a oeste do Sol passam a ser visualizadas. Como as estrelas eram consideradas fixas na esfera celeste (o que só é válido em primeira aproximação), eles concluíram que era o Sol que se movimentava. Esse movimento, denominado movimento anual aparente do Sol, faz com que este se desloque cerca de 1 grau por dia (de oeste para leste). Daí a origem do círculo geométrico de 360° (provavelmente no Egito Antigo).

O movimento anual do Sol define no céu uma trajetória circular, a qual foi denominada eclíptica, porque é onde a Lua se situa na ocasião de um eclipse (veja a Figura 1.10). O plano dessa trajetória circular anual do Sol é inclinado em relação ao plano do equador celeste, em cerca de 23°,5 (veja a Figura 1.7). O plano da eclíptica define o plano da órbita da Terra em torno do Sol. O círculo da eclíptica é, simplesmente, a projeção de seu respectivo plano na esfera celeste. Ao longo da direção da eclíptica no céu foram

concebidas, pelos povos antigos da Mesopotâmia, as constelações do Zodíaco, associadas a lendas e mitos desses povos (leia também ANO SOLAR E LUNAÇÃO, na seção PERCEPÇÃO E CONTAGEM DO TEMPO).

1.5.2 SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS

O movimento anual aparente do Sol na esfera celeste pode ser entendido através da translação da Terra em torno do Sol (visão heliocêntrica em conjunto com a visão geocêntrica), ou da observação do pôr do Sol (visão topocêntrica).

A Figura 1.7 mostra a Terra em quatro ocasiões especiais de sua órbita ao redor do Sol. São os dias em que ocorrem os solstícios e equinócios. Tomemos como referência o hemisfério sul da Terra. Na posição 1, fixando nossa visão a partir da Terra, o Sol está na distância angular máxima ao norte do plano do equador celeste, parecendo parar na esfera celeste para depois retroceder, para o sul, em seu movimento anual aparente. Os raios solares, nessa época do ano, incidem mais obliquamente sobre a superfície do hemisfério sul da Terra, de forma que a incidência de calor é menor. Esse dia é denominado solstício do inverno austral (solstício significa Sol parado; em latim: *solstitium*), o qual ocorre por volta de 22 de junho. A noite do solstício do inverno austral é a mais longa do ano. A partir do solstício de inverno, tanto os “dias claros” como os dias civis e astronômicos voltam a aumentar de duração, lentamente.

De modo análogo, na posição 3 da Figura 1.7, quando ocorre o “dia claro” mais longo do ano para o hemisfério sul, o Sol atinge a posição angular mais ao sul do equador celeste. É o dia do solstício do verão austral, que ocorre por volta de 21 de dezembro. No verão, a incidência dos raios solares acontece de forma menos oblíqua à superfície. Em lugares próximos ao Trópico de Capricórnio, a incidência é quase perpendicular. Portanto, a insolação é maior. Após o solstício de verão, os “dias claros” se tornam cada vez mais curtos novamente.

Em duas ocasiões especiais intermediárias (posições 2 e 4 da Figura 1.7), o “dia claro” e a noite têm a mesma duração (isso ocorre para todo o globo terrestre). São os dias dos equinócios de primavera e outono, que ocorrem, respectivamente, em torno de 22 de setembro e 21 de março no hemisfério sul. A palavra equinócio, de origem latina, significa noites de iguais duração. Os equinócios ocorrem quando o Sol está sobre o

círculo do equador celeste, deslocando-se do hemisfério celeste norte para o sul, no caso do equinócio da primavera austral, e fazendo o caminho inverso, no equinócio do outono austral. Nesses dias, ambos os hemisférios terrestres recebem a mesma quantidade de insolação. Entre o início do outono austral e o fim do inverno, os "dias claros" são mais curtos do que as noites (a noite mais longa ocorre no início do inverno), e entre o início da primavera e o fim do verão, a situação se inverte (o dia mais longo ocorre no início do verão).

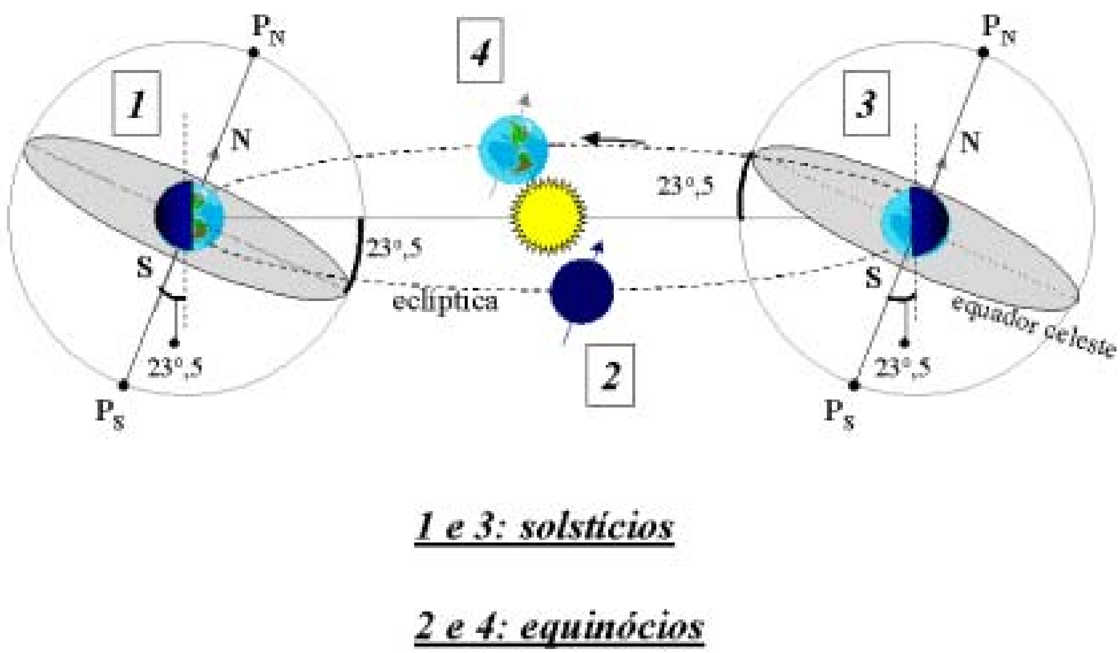


FIGURA 1.7 - OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO ANO ATRAVÉS DAS PERSPECTIVAS HELIOCÊNTRICA E GEOCÊNTRICA (A ILUSTRAÇÃO ESTÁ FORA DE ESCALA).

Seqüencialmente, para o hemisfério sul da Terra, tem-se: o equinócio de outono em 20 ou 21 de março, o solstício de inverno entre 21 e 23 de junho, o equinócio de primavera em 22 ou 23 de setembro e o solstício de verão entre 21 e 23 de dezembro. As estações do ano acontecem de forma inversa em cada um dos hemisférios terrestres. Enquanto é verão no hemisfério sul, é inverno no hemisfério norte.

A fim de complementar o entendimento, vamos pensar na observação do nascer e pôr do Sol nos dias dos equinócios e solstícios, como está representado na Figura 1.8, para <u>um local na região tropical do hemisfério sul</u> (entre o equador e o Trópico de Capricórnio). Somente nos equinócios o Sol surge no horizonte exatamente a partir do ponto cardeal leste, deslocando-se ao longo do dia sobre o equador do céu e escondendo-se, exatamente também, no ponto cardeal oeste (isso ocorre para quase toda a Terra; as exceções são os pólos geográficos). Os solstícios são os dias quando o Sol mais se distancia dos pontos cardeais leste e oeste, no nascer e ocaso, respectivamente. No solstício do verão austral, o Sol surge mais ao sul do ponto leste e esconde-se, com o mesmo distanciamento, ao sul do ponto oeste. No solstício do inverno austral, o Sol nasce com o maior afastamento angular ao norte do ponto leste e põe-se, com o mesmo distanciamento, ao norte do ponto oeste (veja a Figura 1.8). O distanciamento angular máximo que a direção do Sol pode assumir em relação ao equador celeste é exatamente igual à inclinação entre o plano da eclíptica e o plano do equador ($\cong 23°,5$). O ângulo entre a direção do Sol e a do ponto cardeal leste, medido sobre o círculo do horizonte no momento do nascer do Sol em qualquer dia do ano depende da latitude do lugar e da declinação do Sol, exceto nos equinócios quando esse ângulo é nulo.

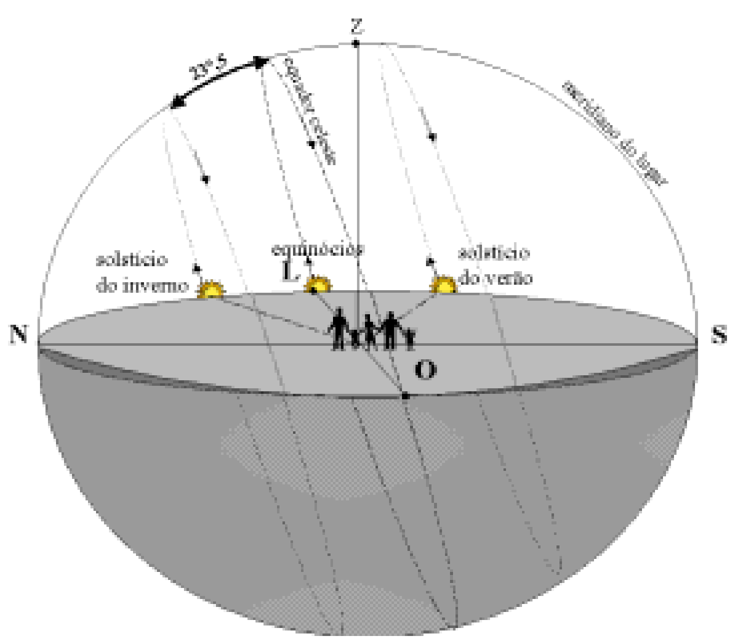


FIGURA 1.8 - VISÃO TOPOCÊNTRICA PARA O NASCER DO SOL NOS SOLSTÍCIOS E EQUINÓCIOS PARA UM LUGAR TROPICAL DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA.

SOL A PINO E TRÓPICOS

Somente na região tropical, o Sol pode ficar a pino ao meio-dia (solar). Entre os trópicos isto acontece duas vezes por ano, como no caso da Figura 1.8, e os dias correspondentes são determinados pela latitude do lugar. Para um local no equador terrestre, o Sol cruza a pino o meridiano local nos dias dos equinócios. Já para os locais situados exatamente sobre um dos trópicos, o Sol cruza a pino somente uma vez, no solstício de verão. Os Trópicos de Capricórnio e Câncer são nomeados desta maneira porque durante os solstícios, na Antigüidade, o Sol se encontrava na direção dessas constelações zodiacais.

1.5.3 INCLINAÇÃO DO EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA

O ângulo formado entre o eixo de rotação da Terra e a perpendicular da eclíptica é, exatamente, igual à separação angular entre o plano do equador da Terra e o plano da órbita terrestre (eclíptica). A Figura 1.7 ilustra essa inclinação do eixo de rotação da Terra.

Na época atual, a inclinação entre o plano do equador e o da eclíptica é de aproximadamente 23°,5 (exatamente 23° 27’ 08’’). Se, por acaso, a inclinação fosse 0°, ou seja, a Terra girasse com o seu eixo perpendicularmente ao plano da eclíptica, todos os “dias claros” e noites teriam sempre a mesma duração (12 h); seria um eterno equinócio (os planos da eclíptica e do equador coincidiriam) e não existiriam as estações do ano.

A inclinação do eixo da Terra muda com o tempo, porque esta se movimenta semelhante a um pião que gira obliquamente ao chão. Um dos movimentos, denominado precessão dos equinócios, faz o eixo da Terra girar em torno da perpendicular da eclíptica com um período de cerca de 25.800 anos. Outro movimento, chamado nutação, faz o ângulo dessa inclinação oscilar em torno de um valor médio. Ambos os movimentos são determinados pela interação gravitacional da Lua, Sol e planetas sobre a Terra, em função desta não ser uma esfera perfeita. O movimento de precessão produziria uma modificação lenta e gradual nas datas dos solstícios e equinócios, antecipando-as, caso a correção correspondente não fosse aplicada ao sistema de coordenadas celestes equatoriais. Com relação às observações astronômicas,

esses movimentos alteram lentamente as coordenadas equatoriais dos astros, em virtude de modificarem a direção dos pólos celestes. Hiparco, antigo astrônomo grego (200 a.C.), já havia notado os efeitos da precessão dos equinócios, ao comparar as suas medidas de posição de estrelas com outras feitas tempos atrás. Para a Astrologia, esses movimentos não são levados em conta, provocando inclusive uma separação gradual entre a posição dos signos e suas respectivas constelações originais. Por exemplo, o autor deste capítulo, que nasceu num certo dia do mês de maio, é do signo de Gêmeos segundo a Astrologia, mas o Sol nessa data está na direção da constelação de Touro.

1.5.4 GEOCENTRISMO, HELIOCENTRISMO E TRANSLAÇÃO

Do ponto de vista terrestre (visão geocêntrica), o Sol parece completar uma volta em torno da Terra em um ano. O mesmo ocorre com a Lua e os planetas, só que em períodos distintos. Todos esses astros possuem movimentos anuais aparentes com trajetórias próximas à trajetória do Sol, no mesmo sentido do movimento solar (de oeste para leste). Daí a origem do modelo geocêntrico, que tentou explicar os movimentos desses astros errantes por entre as constelações zodiacais; todos deslocando-se em torno da Terra imóvel. O geocentrismo perdurou até surgir o heliocentrismo, que explicava de forma mais simples alguns movimentos “estranhos” que os planetas realizavam no céu. Esses movimentos peculiares dos planetas faziam os mesmos retrocederem na sua trajetória padrão oeste-leste, alguns deles traçando até mesmo pequenas trajetórias em forma de laços. Além do mais, o heliocentrismo de Copérnico foi sustentado pela Teoria da Gravitação Universal elaborada por Newton (leia mais no Capítulo 3).

O modelo heliocêntrico associado à Gravitação Universal explicou como a Terra e os demais planetas orbitam em torno do Sol. Esse movimento é denominado translação (ao redor do Sol). O movimento de translação da Terra acontece num plano, aquele da eclíptica. A órbita da Terra não é um círculo perfeito, mas sim uma elipse pouco excêntrica (quase circular). Em primeira aproximação, o Sol ocupa um dos focos da elipse, como representado na Figura 1.9. Na verdade, a Terra translada em torno do centro de massa do Sistema Solar (leia o Capítulo 3 e a caixa de texto O QUE É CENTRO DE MASSA? da seção seguinte). A translação da Terra pode ser chamada de movimento orbital. A velocidade média de translação é de cerca de 107.000 km/h (ou 30 km/s). Definitivamente, nós não estamos imóveis no Universo.

O movimento de translação da Terra ocorre no mesmo sentido da sua rotação (de oeste para leste). Aplica-se a regra da mão direita a fim de visualizá-lo. Nunca é demais lembrar que a perpendicular da eclíptica e o eixo da Terra não coincidem.

A velocidade de translação da Terra foi obtida por medição direta astronômica em 1729 através dos trabalhos do físico inglês James Bradley, o qual visava medir distâncias de estrelas. Bradley observou algo inesperado: a luz das estrelas sofria um desvio sistemático de direção. A explicação é dada pela combinação da velocidade da Terra ao redor do Sol (30 km/s em média) com a velocidade da luz (≈300.000 km/s). Esse efeito é denominado de aberração da luz.

Alguém poderia afirmar que as estações do ano decorrem da variação da distância Terra-Sol, contudo esta pessoa deve lembrar que as estações ocorrem alternadamente em ambos os hemisférios terrestres. Mesmo que a variação na distância acarrete pequenas alterações no fluxo de luz solar recebido pela Terra, 6,5% no máximo, não há conseqüências maiores para as estações do ano. Quando é verão no hemisfério sul, a Terra encontra-se mais próxima do Sol do que quando é verão no hemisfério norte (Figura 1.9), mas nem por isso o verão é mais intenso no hemisfério sul.

ANO SIDERAL

O intervalo de tempo que a Terra leva para transladar completamente em torno do Sol depende do referencial assumido. No caso do ano solar, a referência é o próprio Sol. Já o ano sideral é o intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas da Terra pelo mesmo ponto de sua órbita, dado em referência às estrelas. Enquanto o ano solar tem 365,2422 dias (solares), o ano sideral tem 365,25636; ou seja, o ano sideral é mais longo cerca de 20 min. Você poderia perguntar agora: <u>- Por que não se adota o ano sideral no calendário?</u> Simplesmente porque os inícios das estações do ano são determinados pelo ano solar e não pelo sideral. Se usássemos o ano sideral, a cada 72 anos as estações do ano começariam um dia mais cedo, pois estaríamos acrescentado um dia (20 min/ano x 72 anos = 24 h). Com o passar dos anos, a diferença entre o início real de uma estação e o seu início no calendário aumentaria, chegando a 1 mês após 2.160 anos.

UNIDADE ASTRONÔMICA

O semi-eixo maior da órbita elíptica da Terra ao redor Sol é de 149.597.870 km, sendo denominada de unidade astronômica (UA). Veja a definição de elipse no Capítulo 3. A distância Terra-Sol varia de um valor mínimo, em torno de 147 milhões de quilômetros, a um máximo por volta de 152 milhões de quilômetros.

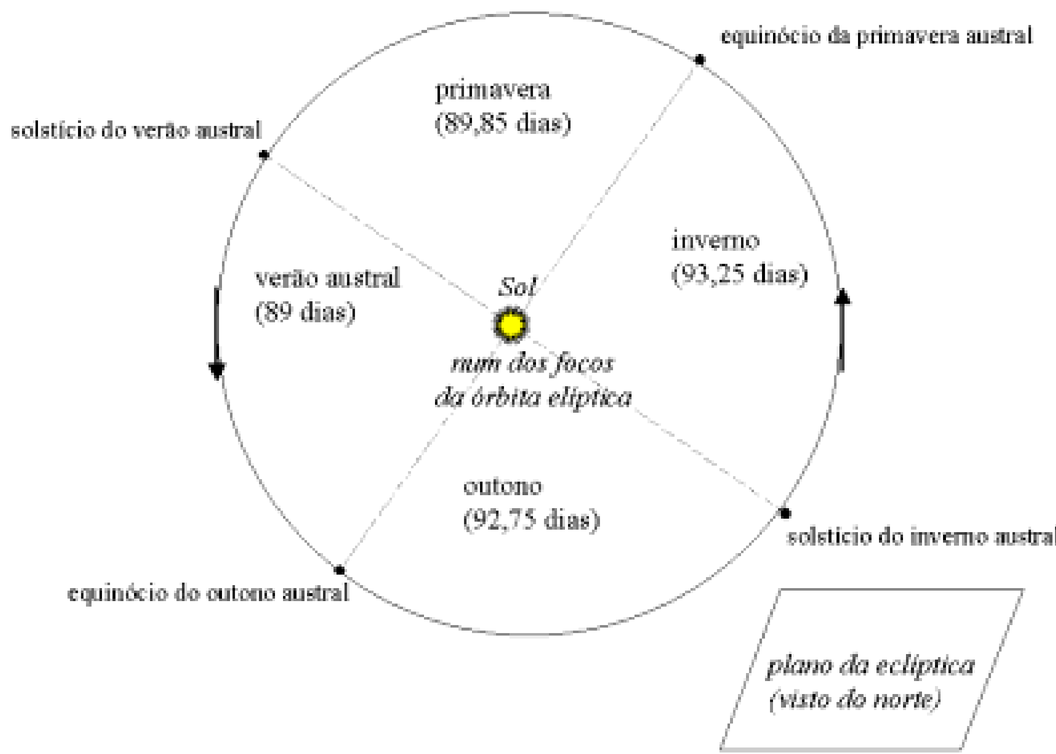


FIGURA 1.9 - A TRANSLAÇÃO DA TERRA (VISTA DO NORTE DA ECLÍPTICA), COM OS INÍCIOS DAS ESTAÇÕES DO HEMISFÉRIO SUL ASSINALADOS (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

1.5.5 ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES ESTAÇÕES

A partir da visão da Terra, o Sol parece atravessar as constelações zodiacais anualmente, como se pode entender através da Figura 1.10. Quando o Sol se dispõe na direção de uma determinada constelação do Zodíaco, esta e várias outras ao norte e ao sul não podem ser visualizadas. Grande parte de uma faixa de quase 18 graus da esfera celeste (em ascenção reta centrada no Sol) não é visualizada devido ao ofuscamento

pelo Sol. Imagine que o céu fosse um gigantesco balão esférico de São João (sem boca) de tal modo que os pólos celestes fossem os dois pontos de encontro de todos os 20 gomos de largura de 18° cada. O Sol estaria no centro deste balão e a Terra (com rotação diária) transladaria dentro do balão ao redor do Sol central (como na Figura 1.10). A faixa de ascensão reta ofuscada pelo Sol corresponderia ao gomo do balão que estivesse na direção do Sol. Consequentemente, todos os demais "gomos" do céu poderiam ser observados ao longo da noite. O "gomo" celeste diametralmente oposto àquele ofuscado pelo Sol seria avistado preferencialmente à meia-noite. Vale lembrar que a extensão (norte-sul) visível de cada "gomo" celeste avistado seria dependente da posição em latitude do observador na Terra (veja ASPECTOS DO CÉU EM DIFERENTES LATITUDES, na seção DIAS E NOITES). Para as regiões equatoriais, poderíamos observar praticamente toda extensão de cada "gomo". A partir do hemisfério sul da Terra, observaríamos preferencialmente a extensão sul dos "gomos".

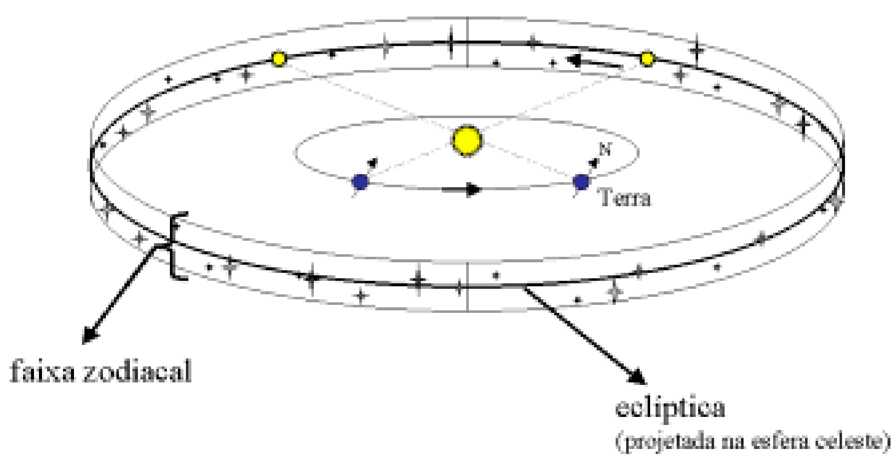


FIGURA 1.10 - MOVIMENTO APARENTE ANUAL DO SOL POR ENTRE AS CONSTELAÇÕES ZODIACIAS DEVIDO À TRANSLAÇÃO DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

A fim de ilustrar melhor, pensemos no caso do Brasil, mais especificamente na latitude de São José dos Campos. Nessa situação, o pólo celeste elevado é o Sul. Vamos fixar um determinado horário, 21h (tempo civil), para a observação do aspecto do céu noturno.

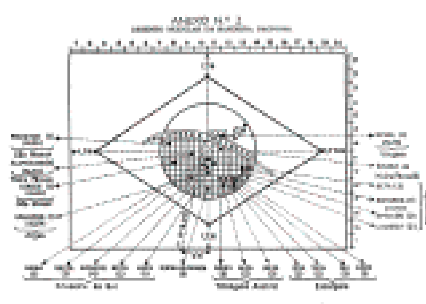
Na Tabela 1.1 são apresentadas as constelações mais fáceis de serem identificadas quanto à localização das mesmas na esfera celeste para o meio de cada estação. As constelações do Zodíaco são listadas conforme suas disposições de leste para oeste no céu. O(s) nome(s) da(s) estrela(s) mais brilhante(s) correspondente(s), facilmente observada(s) a olho nu, é(são) apresentada(s) entre parênteses para algumas constelações.

CONSTELAÇÕES ZODIACAIS

As constelações zodiacais representam, em sua maioria, contornos de animais; vem daí essa nomenclatura de origem grega (do grego *zodiakós*; *zoo*: animais e *kyklos*: círculo). Originalmente, foram concebidas pelos povos sumerianos, Antiga Mesopotâmia, e adaptadas pela antiga cultura grega. Classicamente, as constelações do Zodíaco são em número de doze. Contudo, existe mais uma que se situa na direção da eclíptica: é a constelação do Ofiúco ou Serpentário, a qual foi concebida na mesma época das demais.

As Figuras 1.11 a 1.14 mostram as configurações projetadas do céu, no plano do horizonte, para esse local às 21h nessas datas. Para utilizar essas cartas celestes sazonais com o intuito de reconhecimento do céu noturno, você deve segurá-las acima de sua cabeça fazendo coincidir as direções N-S e L-O com a orientação geográfica local (é preferível ficar de frente para o Sul).

BANDEIRA NACIONAL



A bandeira da República Federativa do Brasil possui um círculo azul estrelado. As estrelas representam os 26 estados brasileiros e o Distrito Federal, estando dispostas numa configuração espelhada para o céu do Rio de Janeiro, no momento da proclamação da República (8h30min, 15/11/1889). Em especial, podemos visualizar a constelação do Cruzeiro do Sul (invertida da esquerda para direita), como hipoteticamente seria vista de fora da esfera celeste. Quatro estados da Região Norte não estão representados nesse modelo oficial da bandeira.

TABELA 1.1 - CONSTELAÇÕES VISÍVEIS POR ESTAÇÃO DO ANO PARA O HEMISFÉRIO SUL.

	Zodiacais	**Austrais (S)**	**Equatoriais**	**Boreais (N)**
Verão	Câncer ou Caranguejo, Gêmeos (Castor e Pollux), Touro (Aldebaran) e Áries ou Carneiro.	Cão Maior (Sirius).	Órion (Betelgeuse, Rigel e as "Três Marias").	Cocheiro (Capella) e as zodiacais da estação.
Outono	Libra ou Balança, Virgem (Spica) e Leão (Regulus).	Cruzeiro do Sul (Acrux, Mimosa e Gacrux), Centauro (Rigil Kent e Hadar) e Libra.	Virgem.	Boieiro (Arcturus) e Leão.
Inverno	Capricórnio, Sagitário, Ofiúco e Escorpião (Antares).	As zodiacais da estação e Centauro (Rigil Kent e Hadar).	Águia (Altair) e Ofiúco.	Cisne (Deneb), Lira (Vega) e Hércules.
Primavera	Peixes, Aquário e Capricórnio.	Grou (Al Na'ir), Peixe Austral (Formalhaut), Eridano (Achernar) e Capricórnio.	Peixes e Aquário.	Andrômeda e Pégaso.

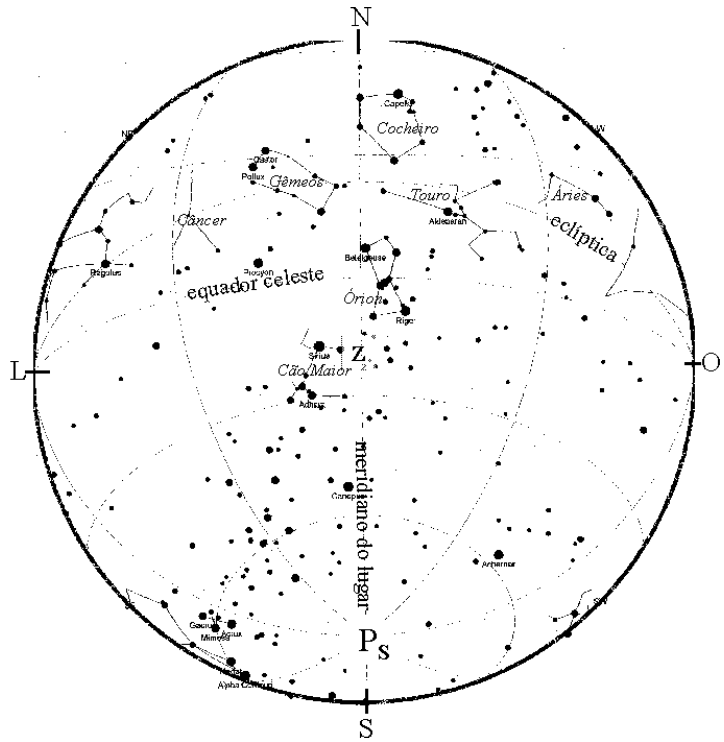


FIGURA 1.11 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO VERÃO.

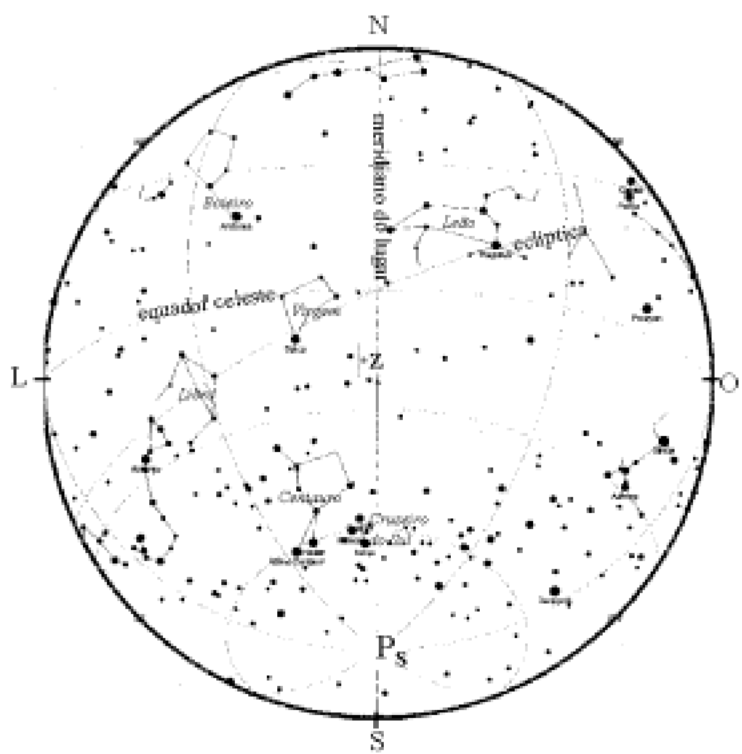


FIGURA 1.12 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO OUTONO.

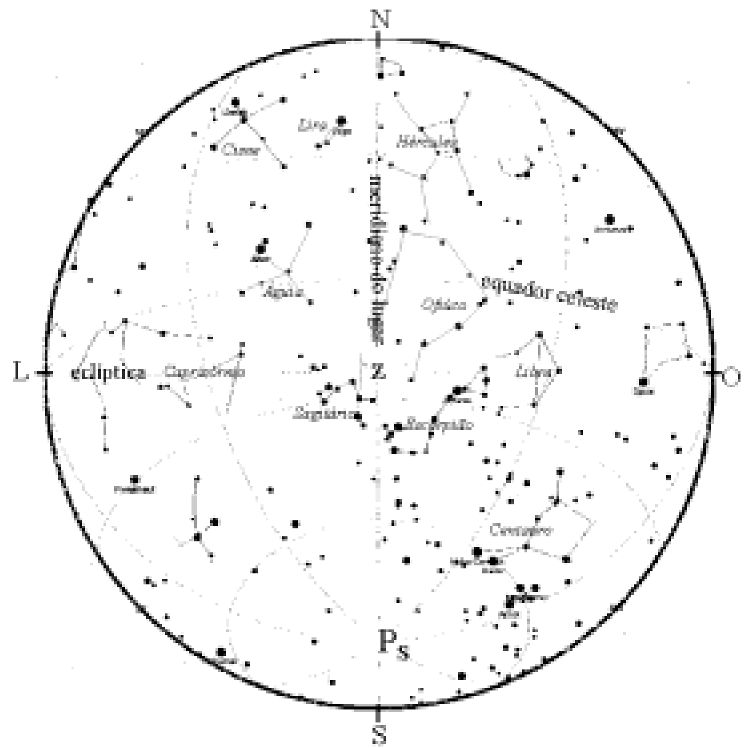


FIGURA 1.13 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DO INVERNO.

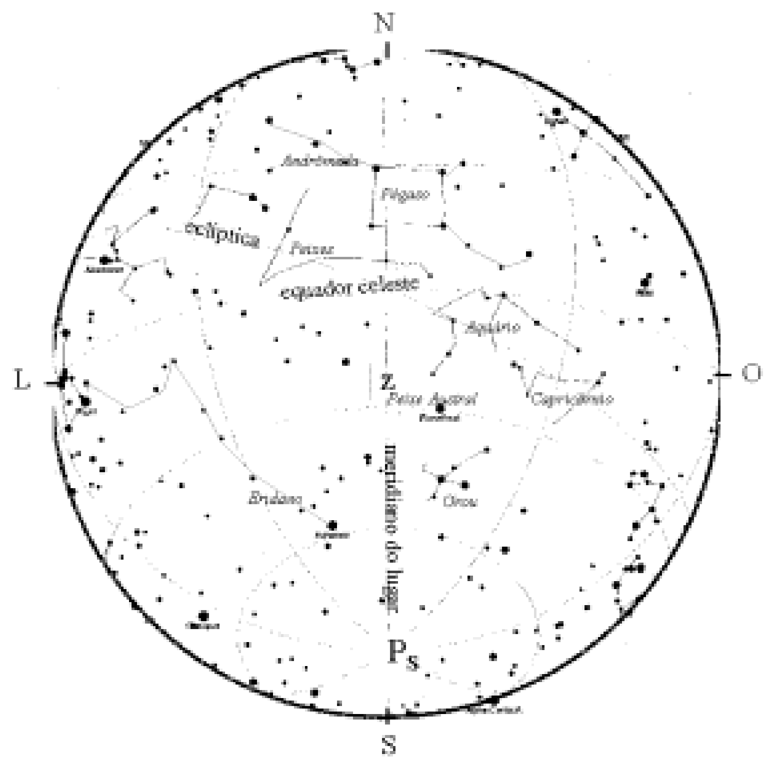


FIGURA 1.14 - PROJEÇÃO DO CÉU PARA SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, ÀS 21H, PARA O MEIO DA PRIMAVERA.

1.6 FASES DA LUA

A Lua é o único satélite natural da Terra. Foi denominada, na antigüidade, de *Luna*, antiga cidade de Tucana (Itália) pelos romanos e *Selene*, irmã de Hélio e filha de Hipérion e Téia pelos gregos. É o astro mais brilhante do céu noturno.

As fases da Lua correspondem aos diferentes aspectos com que esta se apresenta no céu ao longo das noites e dos "dias claros" de um mês. Isso não é devido à projeção da sombra da Terra na Lua, como alguns podem pensar. Mas sim, devido à visualização que temos da Lua conforme ela orbita em torno da Terra (posição relativa entre a Lua, Terra e Sol). A fase da Lua é um fenômeno astronômico de observação simultânea para todo o globo terrestre (quando a Lua cheia é vista do Brasil, ela é também vista como tal em Portugal).

Com certa regularidade, a Lua ora atravessa a sombra da Terra (eclipse da Lua), ora projeta sua sombra na superfície terrestre (eclipse do Sol).

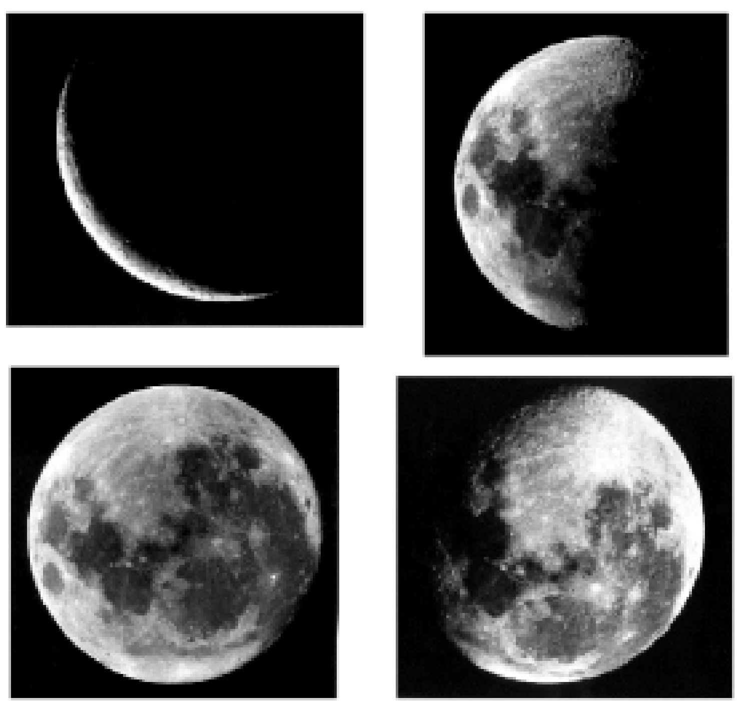


FIGURA 1.15 - A LUA EM FASES DISTINTAS (FOTOS DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1988).

1.6.1 ASTROS LUMINOSOS E ILUMINADOS

O Sol, assim como as outras estrelas, são astros que produzem e emitem radiação eletromagnética em vários comprimentos de onda (ler os Capítulos 2 a 5); ou seja, são fontes de ondas de rádio, microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama, em ordem crescente de energia luminosa. A Lua, os planetas (incluindo a Terra) e os corpos menores do Sistema Solar são astros iluminados pelo Sol. Portanto, a Lua e os planetas são visualizados por nós simplesmente porque refletem a luz visível solar incidente. A superfície da Lua reflete cerca de 7% da luz solar incidente.

1.6.2 TRANSLAÇÃO DA LUA

O intervalo de tempo que a Lua gasta para completar uma volta completa em torno do centro de massa do sistema Terra-Lua, em relação ao referencial das estrelas, é chamado de período sideral; é igual a 27 dias, 7 horas, 43 minutos e 12 segundos (solares). Já o intervalo de tempo entre duas fases iguais sucessivas (ex. duas fases cheias) é denominado período sinódico ou, simplesmente, lunação; relativo ao referencial terrestre. Uma lunação dura 29 dias, 12 h, 44 min e 3 s (solares), maior que o período sideral!; é a base dos calendários lunares. Veja também a seção ANO SOLAR E LUNAÇÃO.

O movimento orbital da Lua (ao redor da Terra, em primeira aproximação) é realizado no mesmo sentido dos movimentos orbital e rotacional da Terra, ou seja, ocorre de oeste para leste. É fácil perceber isso: a Lua sempre “nasce” cerca de 50 minutos mais tarde, dia após dia, em conseqüência de seu movimento de oeste para leste. Aplicando-se novamente a regra da mão direita com o polegar para cima apontando para o norte, tem-se que a Lua translada ao redor da Terra no mesmo sentido que a Terra translada ao redor do Sol. A Figura 1.16 ilustra o movimento de translação da Lua.

A órbita da Lua não é circular mas sim elíptica, de modo que num dos focos da elipse se localiza o centro de massa do sistema Terra-Lua e não o centro da Terra como se poderia pensar. A distância entre os centros da Lua e Terra varia de 357.300 km a 407.100 km. A velocidade média de translação da Lua fica em torno de 3.700 km/h.

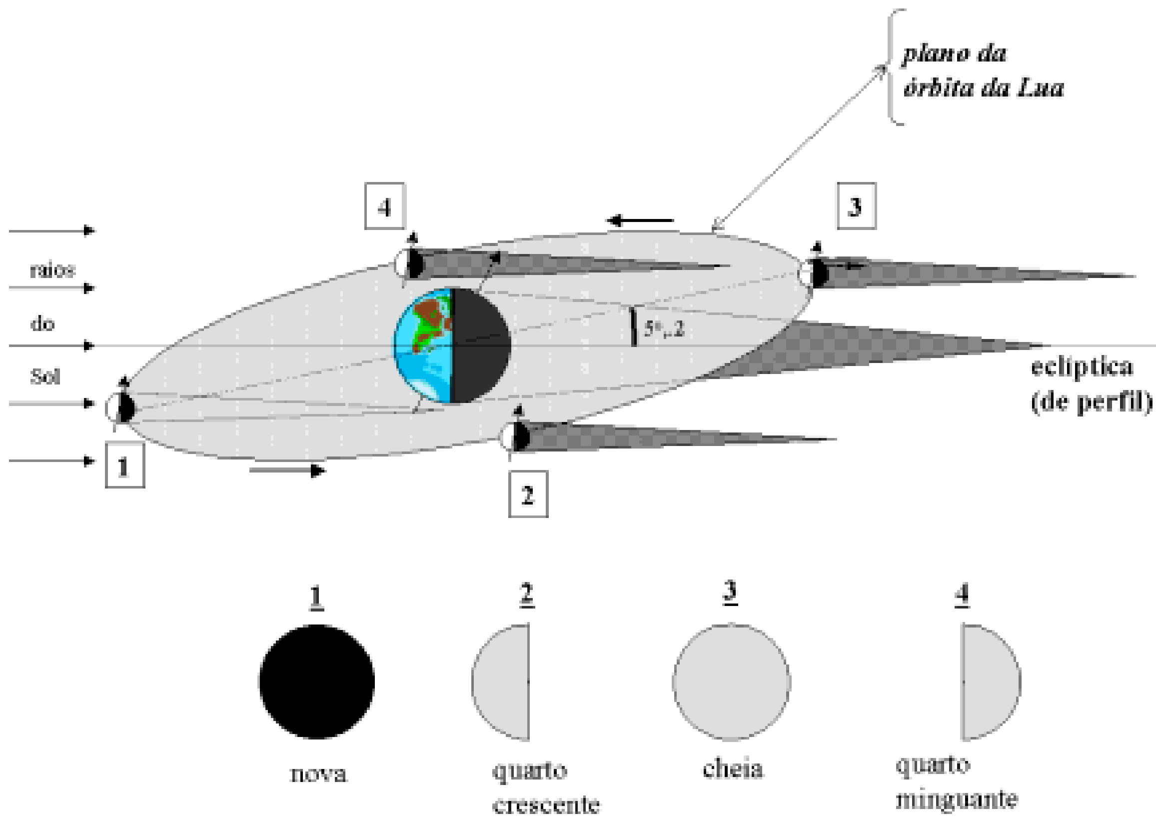


FIGURA 1.16 - A TRANSLAÇÃO DA LUA: SUAS FASES PRINCIPAIS COMO SÃO VISTAS DO HEMISFÉRIO SUL DA TERRA (ILUSTRAÇÃO FORA DE ESCALA).

O QUE É CENTRO DE MASSA?

Centro de massa de um corpo corresponde ao centro geométrico de sua distribuição de massa. É o ponto onde toda a massa do corpo pode ser concentrada para efeito cinemático. O centro de massa pode se situar dentro ou fora do corpo. Por exemplo, no caso de uma bola de futebol, o centro de massa localiza-se no centro dela; no caso de uma aliança de casamento o centro de massa situa-se no seu centro geométrico, externo ao meio material da aliança. O conceito de centro de massa pode ser aplicado para qualquer distribuição de matéria, inclusive para dois corpos. Sua localização depende das características da distribuição de massa (forma geométrica e densidade de matéria). Para dois corpos exatamente iguais (em forma, massa e densidade), o centro de massa do sistema está localizado no ponto eqüidistante de ambos. Se um dos dois corpos tiver maior massa, o centro de massa situar-se-á mais próximo dele.

1.6.3 ROTAÇÃO DA LUA E SUA FACE OCULTA

Além do movimento orbital ao redor da Terra, a Lua também possui um movimento de rotação em torno de si mesma.

O movimento rotacional da Lua também ocorre no mesmo sentido do seu movimento orbital. Pode-se usar a regra da mão direita para a sua visualização. A seta sobre a Lua, na Figura 1.16, ilustra o pólo norte de rotação; seria o polegar da mão direita.

A face "oculta" é a parte da Lua que não podemos avistar a partir da superfície terrestre (Figura 1.17). Em virtude do movimento orbital da Lua estar sincronizado com sua rotação (em 1:1), por questão de equilíbrio dinâmico evolutivo, a Lua tem sempre a mesma parte voltada para a Terra. Seu período de rotação é igual ao seu período sideral de translação: um dia na Lua dura cerca de 27 dias solares da Terra.

A face oculta não corresponde a 50% da superfície lunar. Do ponto de vista terrestre, pode-se avistar mais da metade da Lua, devido a um movimento extra da Lua denominado libração, que é uma oscilação do seu eixo rotacional.

DEMONSTRE A SINCRONIA DOS MOVIMENTOS LUNARES

Enquanto uma pessoa fica parada representando a Terra (vamos fixar a Terra para um entendimento melhor), outra caminha em torno daquela, sempre com o rosto voltado para a Terra. Peça ao resto do grupo para observar se a pessoa que está representando a Lua girou em torno de si mesma. Ou, melhor ainda, pergunte se eles conseguiram visualizar outras partes da Lua além daquela vista pela Terra (ex. a nuca dessa pessoa). Faça-os refletir.

1.6.4 ASPECTOS DAS FASES LUNARES

Na fase de quarto crescente, a Lua está com a metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra. Em certas ocasiões, com a forma parecida com a de um C para o hemisfério sul. Na fase cheia, toda a sua parte iluminada está voltada para a Terra. No quarto minguante, a Lua está com a outra metade de seu hemisfério iluminado voltada para a Terra; forma parecida com um D para o hemisfério sul, em determinadas vezes.

Finalmente, na fase nova, é sua parte não-iluminada pelo Sol que fica voltada para a Terra (não conseguimos ver a Lua!). A Figura 1.16 mostra a Lua nessas quatro fases principais.

Na verdade, as fases da Lua ocorrem de modo contínuo. Na Astronomia, a fase da Lua é conceituada através da fração iluminada do disco lunar voltado para a Terra, que pode ser quantificada de forma percentual ou não. Na fase nova, essa fração é nula, 0,5 (ou 50%) no quarto crescente, 1,0 (ou 100%) na fase cheia e novamente 0,5 no quarto minguante. Outro conceito astronômico adotado na definição da fase lunar é o ângulo Sol-Lua-Terra, denominado ângulo de fase, cujo vértice é a própria Lua. Esse ângulo na ocasião da Lua nova é próximo a 180°, 90° para o quarto crescente, próximo de zero para a fase cheia e novamente 90° para o quarto minguante.

A denominação "Lua crescente" é usada para representar o aspecto lunar entre as fases nova e cheia. O crescente lunar pode ser avistado no céu no fim da tarde e início da noite, sempre na parte oeste do céu. A Lua quarto crescente nasce ao meio-dia e se põe à meia-noite, aproximadamente.

A nomenclatura "Lua minguante" é adotada para o aspecto lunar entre as fases cheia e nova. Ao contrário da crescente, o minguante pode ser visto no fim da noite e início manhã, sempre a leste do meridiano local. A Lua quarto minguante nasce à meia-noite e se põe ao meio-dia do dia seguinte, aproximadamente.

A Lua cheia percorre o céu por praticamente toda a noite, surgindo por volta das 18h e se pondo em torno das 6h.

CURIOSIDADE: DIREÇÃO DO SOL E FASES DA LUA

Obviamente, a face iluminada da Lua aponta sempre para a direção do Sol. Isso pode ser aplicado para sabermos onde o Sol se pôs no horizonte quando da fase crescente, ou de onde ele vai emergir quando a Lua é minguante. É interessante reparar que em muitas montagens fotográficas, exibindo a Lua no céu, há freqüentemente equívocos astronômicos como, por exemplo, mostrando a Lua cheia próxima a um horizonte crepuscular.

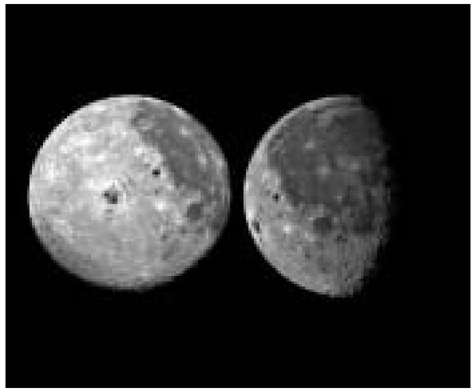


FIGURA 1.17 – A FACE OCULTA DA LUA VISUALIZADA EM DUAS IMAGENS. REPARE QUE A LUA ESTÁ NA SUA FASE NOVA!

1.7 ECLIPSES DA LUA E DO SOL

Na Astronomia, eclipsar significa esconder, encobrir, ou interceptar a luz vinda de um astro.

No Egito Antigo, os eclipses do Sol eram explicados como sendo ataques de uma serpente ao barco que transportava o Sol pelo céu. Os antigos chineses costumavam observar sistematicamente os fenômenos celestes. Registraram e previram diversos eclipses. Pensavam que um imenso dragão estivesse engolindo o Sol durante um eclipse solar. Então, faziam muito barulho para assustar o dragão e o Sol sempre reaparecia (nunca falhava!).

1.7.1 DISTÂNCIAS E DIMENSÕES DO SISTEMA SOL-TERRA-LUA

A olho nu, o tamanho angular da Lua é de aproximadamente 0°,5. Por pura coincidência é semelhante ao tamanho angular do Sol. Deste modo, os dois parecem iguais em tamanho, porém não o são. Nota-se que a Lua está 400 vezes mais próximo da Terra do que o Sol, o qual é cerca de 400 vezes maior em diâmetro.

Hiparco (200 a.C.) calculou a distância e o tamanho da Lua por ocasião de um eclipse lunar, medindo a duração total da etapa umbral. Ele aplicou alguns conhecimentos geométricos, conjugados a outras medidas conhecidas na época (duração do mês lunar e dimensões angulares da Lua e do Sol).

A distância Terra-Sol em função da distância Terra-Lua foi calculada por Aristarco de Samus (300 a.C.). Ele observou simultaneamente a Lua em quarto crescente e o pôr do Sol. Quando o Sol estava no horizonte, Aristarco mediu a separação angular entre a Lua e o Sol, a qual representa um dos ângulos do triângulo retângulo Terra-Lua-Sol (Figura 1.18), cujo vértice do ângulo reto (90°) é a Lua. O ângulo medido ficou em torno de 87° proporcionando uma distância Terra-Sol de 7.300.000 km, muito abaixo do valor moderno (Tabela 1.2).

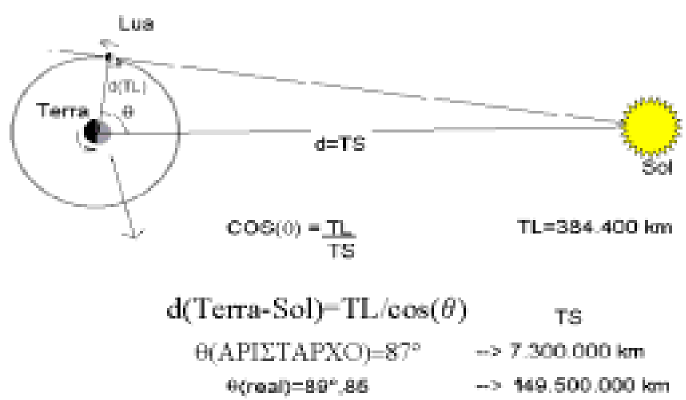


FIGURA 1.18 - CÁLCULO DA DISTÂNCIA TERRA-SOL FEITO POR ARISTARCO (300 A.C.).

TABELA 1.2 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DO SOL, TERRA E LUA.

	Diâmetro equatorial	**Massa (comparativa à Terra)**	**Volume (comparativo à Terra)**	**Distância média à Terra**
Terra	12.756 km	1	1	------------------
Lua	3.476 km	1/80	1/50	384.400 km
Sol	1.392.000 km	333.000	1.300.000	149.600.000 km

A Figura 1.19 esquematiza a ocorrência de um eclipse total da Lua. A Terra e a Lua estão representadas em tamanhos relativos proporcionais. Se a Terra tivesse 0,5 cm de diâmetro, a Lua deveria ter, aproximadamente, 12,5 mm de diâmetro. A distância Terra-Lua (≅ 15 cm), assim como a trajetória da Lua em volta da Terra, também são representadas em dimensões proporcionais. O Sol seria, nessa mesma escala relativa, uma esfera com aproximadamente 50 cm de diâmetro e estaria a uma distância de cerca 60 m à esquerda da folha de papel. O plano da órbita da Lua (em torno da Terra) não coincide com o plano da órbita da Terra (em torno do Sol). A órbita da Lua está apenas projetada na folha de papel, que está representando o plano da órbita da Terra. Deste modo, a trajetória da Lua está atravessando o papel na região da sombra da Terra.

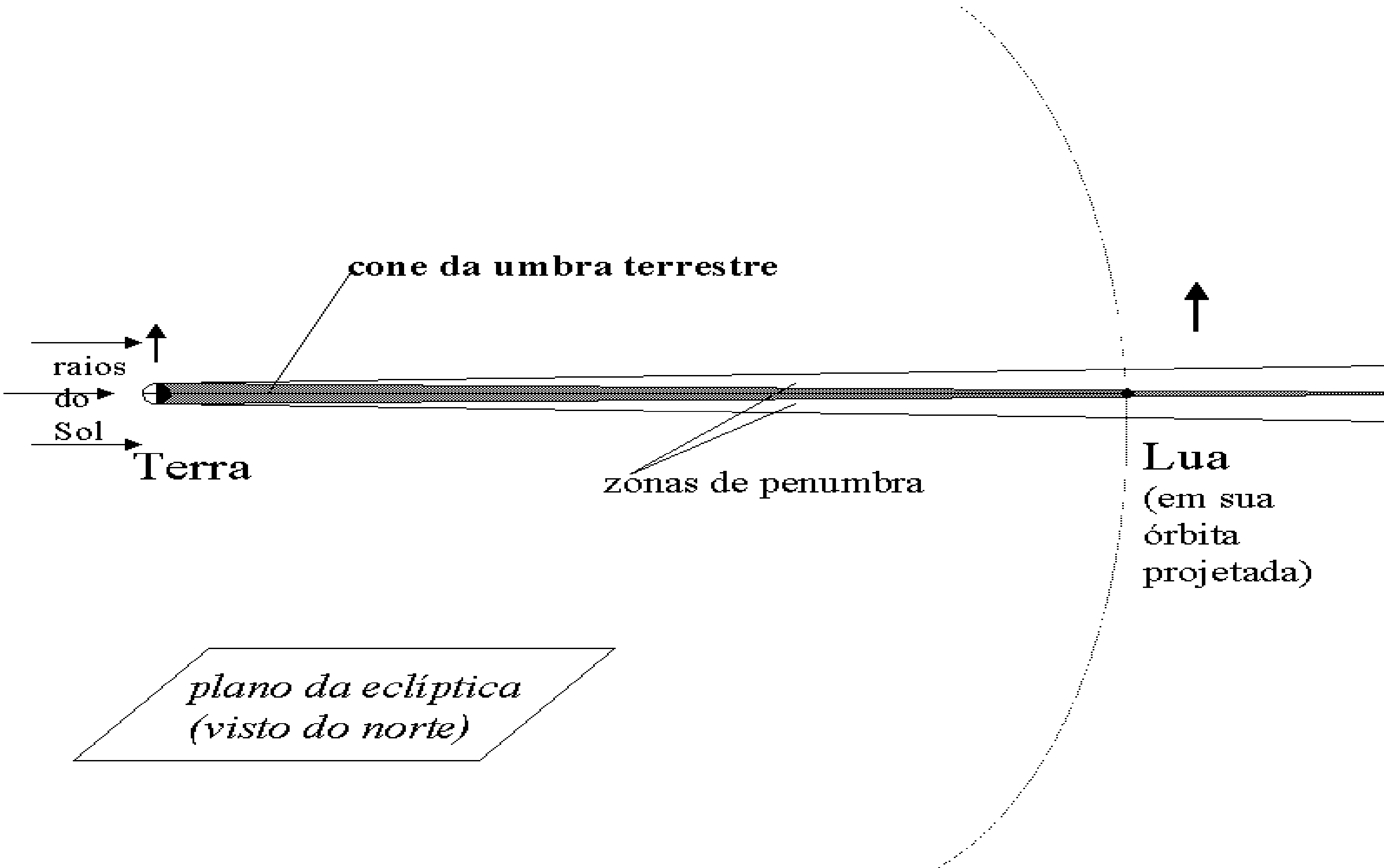


FIGURA 1.19 - ILUSTRAÇÃO EM ESCALA DE UM ECLIPSE TOTAL DA LUA.

1.7.2 TIPOS DE ECLIPSES

O Sol é uma fonte luminosa extensa. Tanto a Lua como a Terra projetam no espaço uma sombra em forma de um cone, cuja base é o próprio corpo, e uma penumbra. O cone de sombra situa-se interno à penumbra. Por definição, o cone umbral não recebe luz solar alguma e a penumbra não recebe luz de todos os pontos do disco solar. No entanto, para a Terra, que possui uma camada de ar ao seu redor, os limites do cone de sombra e da penumbra não são bem determinados. A luz do Sol é espalhada quando atravessa a atmosfera terrestre. O mesmo não ocorre para a Lua.

Os eclipses lunares somente ocorrem quando a Lua está na fase cheia. Num eclipse da Lua, ela percorre a penumbra e/ou a sombra da Terra. Apenas poderão ser observados do hemisfério da Terra onde é noite.

Há três tipos de eclipse da Lua: o total, o parcial e o penumbral. O eclipse lunar total acontece quando a Lua é totalmente obscurecida pelo cone de sombra da Terra, o parcial quando somente parte da Lua é obscurecida por esse cone e o penumbral quando a Lua percorre apenas a zona da penumbra terrestre (é o menos pronunciável dos três). Na ocasião de um eclipse total ou parcial, a Lua percorre a região de penumbra antes e depois de atravessar o cone umbral da Terra. A Figura 1.19 ilustra um eclipse total da Lua em escala.

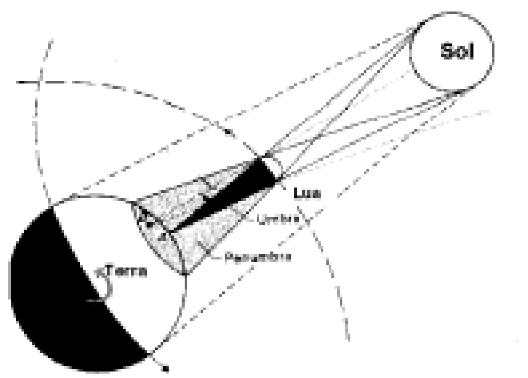
Quando a Lua se situa na umbra terrestre durante um eclipse total, ela não é totalmente obscurecida em virtude da luz solar ser espalhada pela atmosfera da Terra. Pode-se avistar a Lua, freqüentemente, com uma coloração avermelhada em função do avermelhamento intenso da luz pela atmosfera de nosso planeta (leia o Capítulo 2).

Os eclipses do Sol ocorrem quando a Lua (na fase nova) se coloca entre o Sol e a Terra, projetando sua sombra e/ou penumbra na superfície terrestre. Podem ser parciais ou totais.

O eclipse solar parcial é quando o Sol é parcialmente “encoberto” pelo disco lunar. Há projeção somente da zona de penumbra sobre a Terra. Um tipo especial de eclipse solar parcial é o anular: quando o Sol, a Lua e a Terra ficam alinhados mas devido a uma separação relativa maior da Lua à Terra, o Sol não é totalmente encoberto pela Lua restando apenas um anel visível do disco solar. O eclipse solar anular é observado

apenas da região da superfície terrestre que está exatamente naquele alinhamento Sol-Lua-Terra. Esse eclipse é observado apenas como parcial da região terrestre por onde a penumbra passa.

O eclipse solar total acontece quando a Lua projeta sobre a superfície terrestre tanto seu cone de sombra (a umbra lunar) como sua zona de penumbra (veja a Figura 1.20). Da região da superfície da Terra por onde a umbra da Lua passa, o eclipse é observado realmente como total. Das regiões da Terra por onde somente a penumbra lunar passa, avista-se um eclipse solar parcial.



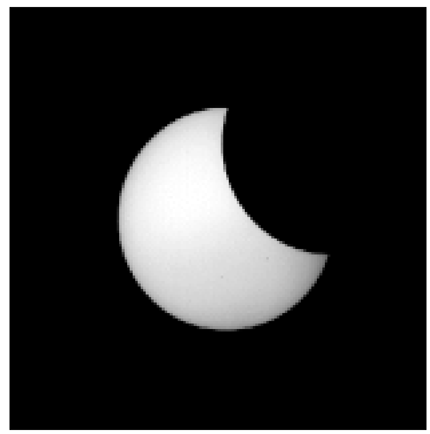


FIGURA 1.20 - ILUSTRAÇÃO DE UM ECLIPSE TOTAL DO SOL (FORA DE ESCALA) COM FOTOGRAFIA FEITA A PARTIR DO PONTO B DONDE É AVISTADO COMO PARCIAL (FOTO DE ANDRÉ MILONE, NO OBSERVATÓRIO DO VALONGO/UFRJ, RIO DE JANEIRO, 1987).

1.7.3 DURAÇÃO E PERIODICIDADE DOS ECLIPSES

A extensão média do cone da sombra terrestre é 1.400.000 km. O diâmetro desse cone na distância média da Lua é cerca de 9.000 km. A duração máxima da etapa umbral de um eclipse lunar é de 3 h e 20 min. A duração da observação de um eclipse da Lua depende do intervalo tempo que a Lua (cheia) fica acima do horizonte na noite do mesmo.

A duração da etapa umbral de um eclipse do Sol (totalidade), a partir de um único ponto terrestre, é de poucos minutos. Já a duração completa de um eclipse solar, incluindo as etapas penumbral (parcialidade) e umbral, fica por volta de 2 h.

Alguém poderia questionar: - Por que não há eclipses da Lua e do Sol em todos os meses, já que os eclipses lunares ocorrem na fase cheia da Lua e os solares na fase nova? A resposta é que os planos das órbitas da Terra (em torno do Sol) e da Lua (em volta da Terra) não são os mesmos. Se as trajetórias da Lua e da Terra ficassem num mesmo plano, todo mês haveria eclipses do Sol e da Lua. O eixo do cone da sombra terrestre situa-se no plano orbital da Terra. A inclinação entre o plano da órbita lunar e o plano da eclíptica é de aproximadamente 5°,2 (veja a Figura 1.16). Esse ângulo é pequeno mas não pode ser desprezado. Na distância em que a Lua se encontra, ela freqüentemente está fora do plano da órbita da Terra. Os eclipses só acontecem quando a trajetória da Lua atravessa a eclíptica quando da ocasião das fases nova ou cheia.

Ocorrem no mínimo 2 eclipses por ano (que são solares) e, no máximo, 7 eclipses por ano: 2 lunares e 5 solares, ou 3 lunares e 4 solares. A cada 18 anos aproximadamente, todos os eclipses acontecem com a mesma regularidade. Esse intervalo de tempo é denominado de Período de Saros, quando ocorrem 41 eclipses do Sol e 29 eclipses da Lua.

Embora os eclipses lunares sejam menos freqüentes em número, a visualização desse tipo de eclipse a partir de qualquer ponto da Terra é facilitada em função de que basta ter a Lua acima do horizonte para podermos observá-lo (além de um céu sem nuvens obviamente). A observação dos eclipses solares é apresentada na subseção anterior.

1.8 MARÉS DOS OCEANOS

Os pescadores que vivem no litoral conhecem muito bem a regularidade da subida e descida do nível do mar, as quais estão associadas à fase da Lua e ao período do dia. Os pescadores mais artesanais adaptam-se a essa variação do nível do mar. Em determinadas regiões da Terra, como no litoral do Norte e Nordeste do Brasil, é surpreendente a diferença entre o avanço e o recuo marítimos.

1.8.1 INTERAÇÕES SOL-TERRA-LUA

Além da iluminação pelo Sol que fornece energia para sustentar a vida, a Terra sofre a influência gravitacional dessa estrela. Se a Terra hipoteticamente parasse de se movimentar ao redor do Sol, ela seria atraída pela gravidade do mesmo, indo ao seu encontro.

Os movimentos de translação da Terra e da Lua podem ser tratados como movimentos de massas pontuais. Contudo, a Terra e a Lua são corpos de dimensões não-desprezíveis. Além do mais, eles não são rígidos como se poderia supor.

A força gravitacional do Sol ao ponto mais próximo da Terra é maior do que a força do lado diametralmente oposto da superfície; a diferença na distância desses dois pontos é igual, no máximo, ao diâmetro equatorial do planeta. Ocorre, então, o fenômeno denominado de efeito de maré. O mesmo pode-se ser dito para interação entre a Lua e a Terra. Tanto a crosta terrestre como a lunar sofrem o efeito de maré respectivamente devido à ação da Lua e da Terra. A atmosfera da Terra também sofre o efeito de maré, o qual não será tratado aqui. Não iremos tratar também do efeito de maré sobre a crosta da Terra, mas sim sobre sua massa líquida superficial que se comunica entre si. Em função do efeito de maré sobre os oceanos, cujo predomínio é da Lua, o nível do mar eleva-se basicamente na direção do vetor resultante da composição do efeito de maré Lua-Terra (peso 2) e do efeito de maré Sol-Terra (peso 1). Na Figura 1.21, visualiza-se a ocorrência das marés altas na direção Sol-Terra-Lua, em pontos diametralmente opostos quando da ocasião da Lua cheia. As marés baixas ocorrem em pontos da superfície oceânica situados na direção perpendicular àquela direção. Na fase nova da Lua, a situação repete-se.

1.8.2 PERIODICIDADE DAS CHEIAS E VAZANTES

Sem a presença da Lua, os oceanos da Terra sentiriam o efeito de maré apenas devido ao Sol. As cheias, também chamadas de preamar, ocorreriam sempre próximo ao meio-dia (solar) e à meia-noite. As vazantes, ou baixa-mar, seriam às 6h (manhã) e 18h, aproximadamente. Ambas não seriam tão pronunciadas. Portanto, fixando-se um local na Terra a periodicidade das marés seria determinada apenas pela rotação terrestre.

Com a presença da Lua, a situação já é outra. Em virtude da Lua estar cerca de 400 vezes mais próxima do que o Sol, seu efeito de maré sobre a Terra é aproximadamente o dobro do efeito de maré devido ao Sol, mesmo que esse tenha 27 milhões de vezes mais massa do que a Lua. O diâmetro terrestre é cerca de 3% da distância Terra-Lua e, aproximadamente, 0,01% da distância Terra-Sol.

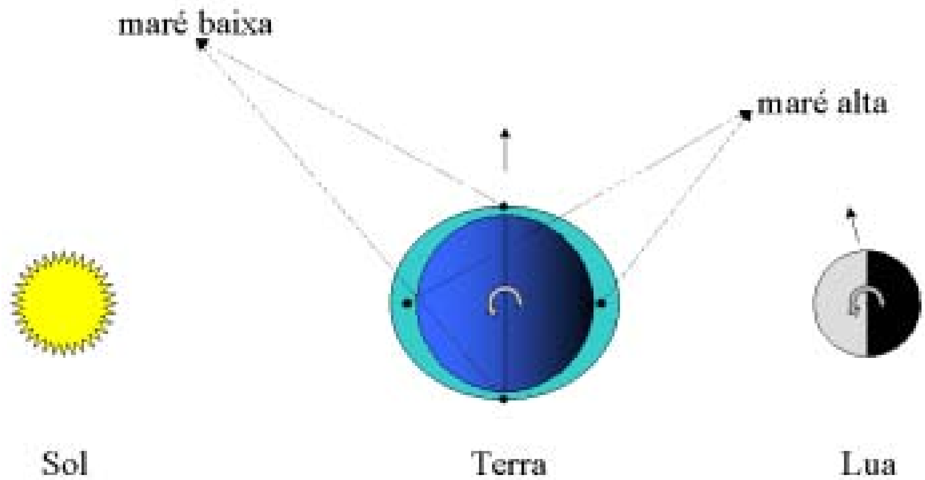


FIGURA 1.21 - ILUSTRAÇÃO DO EFEITO DE MARÉ TOTAL SOBRE OS OCEANOS DA TERRA NA OCASIÃO DA LUA CHEIA (VISÃO DO NORTE DA ECLÍPTICA, FORA DE ESCALA).

A intensidade das marés dos oceanos é dependente em primeira instância da fase lunar. Outros fatores são a configuração litorânea e a profundidade do mar (baía ou lagoa). Quanto menos profunda a plataforma continental, maior é o desnível entre as marés alta e baixa.

Nas fases nova e cheia da Lua, o efeito de maré da Lua é somado diretamente ao do Sol. Nessas ocasiões, as cheias e vazantes dos oceanos são as mais acentuadas de todo ciclo lunar (Figura 1.21). As cheias ocorrem ao meio-dia e à meia-noite aproximadamente. As vazantes acontecem nos instantes intermediários (≈ 6h e 18h). Quando a Lua está em quarto crescente, as cheias são observadas por volta das 4h (madrugada) e 16h e as

vazantes por volta das 10h e 22h. No quarto minguante, as marés altas ocorrem em torno das 8h e 20h e as baixas por volta das 2h e 14h. Modifique a Figura 1.21 para um entendimento melhor.

Portanto, tem-se uma maré alta a cada 12 horas sempre intercalada de uma maré baixa que também acontece a cada 12 horas. Partindo do máximo de uma vazante (que é bem curto), teremos de modo intermitente um período de 6 horas para a elevação do nível do mar até o máximo da cheia, seguido de um período igual para a diminuição do nível. Em virtude da Lua surgir no céu cerca de 50 minutos mais tarde a cada dia, os horários das cheias e vazantes atrasam-se da mesma maneira.

Como conseqüência, a subida e descida das marés dos oceanos provocam uma desaceleração da rotação da Terra por atrito entre a massa líquida e o fundo do mar. A velocidade de rotação da Terra está decrescendo de forma lenta e gradual. A cada 10 milhões de anos, o período de rotação terrestre aumenta em aproximadamente 4 minutos.

O QUE É FORÇA GRAVITACIONAL?

A força gravitacional entre dois corpos é sempre atrativa na direção que une seus centros de massa. A força gravitacional exercida pelo primeiro sobre o segundo é igual em intensidade e direção àquela exercida pelo segundo sobre o primeiro, porém atuam em sentidos opostos. A intensidade da força gravitacional, F_{12}, entre dois corpos é diretamente proporcional às massas de cada um, m_1 e m_2 (ou melhor, ao produto das massas) e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros de massa de ambos, d. A intensidade da força gravitacional, em módulo, entre dois corpos é expressa a seguir. A constante de proporcionalidade, G, é a constante de gravitação universal (vale $6,67259 \times 10^{-11}$ Newton.m^2/kg^2 no sistema MKS de unidades).

$$\mathbf{F_{12} = G \times (m_1 \times m_2) \div d^2}$$

A gravidade, g, é simplesmente a aceleração sofrida por um corpo quando sobre ele é exercida uma força gravitacional externa (ou melhor, quando esse corpo se situa no campo gravitacional de outro). Aceleração de um corpo é a variação de sua velocidade por unidade de tempo. A aceleração gravitacional ocorre na direção que une os centros de massas de ambos corpos e no sentido daquele de maior massa.

1.9 BIBLIOGRAFIA

Boczko, R. Astronometria. In: Maciel, W. J. ed. **Astronomia e Astrofísica:** texto do curso de extensão universitária do Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico, USP. São Paulo, 1991.

Boczko, R. Estrutura do Sistema solar. In: Maciel, W. J. ed. **Astronomia e Astrofísica:** texto do curso de extensão universitária do Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico, USP. São Paulo, 1991.

Caniato, R. **O céu**: Projeto Brasileiro de Ensino de Física. 3.ed. Campinas: Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia, 1978. v.1

de Freitas, S. M. **O Universo:** nem aristotélico, nem ptlomaico: apostila do curso dado pela Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SMC/ PCRJ, 1997.

Milone, A. **Astronomia:** notas de aulas dadas no Colégio São Vicente de Paulo. Rio de Janeiro, 1997.

Mourão, R. R. de F. **Dicionário enciclopédico de Astronomia e Astronáutica**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

Rival, M. **Os grandes experimentos científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

Vicino, G. **Programa de la asignatura**: curso único de Astronomia. Uruguai, 1991. Material datilografado sem editor.

Vieira, F. **Identificação do céu**. Rio de Janeiro: Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro, SMC/PCRJ, 1996.

Capítulo 2

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

Francisco José Jablonski*

* e-mail: chico@das.inpe.br

ASTROFÍSICA OBSERVACIONAL

LISTA DE FIGURAS

2.1 O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.1.1 O QUE QUER DIZER ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO?

Hamlet é o nome de uma peça muito famosa escrita por William Shakeaspeare. A cena inicial é impressionante: os guardas de um castelo na Dinamarca vêem o *espectro* do rei Hamlet vagando pelas ameias durante a noite. A explicação para o aparecimento do fantasma fornece o enredo da peça, que contém sete mortes a golpes de espada, envenenamentos e afogamentos, loucuras verdadeiras e simuladas, um adultério, a caveira de um alegre bobo da corte desenterrada no momento oportuno e, é claro, um *espectro* fantasmagórico. No cinema, uma das montagens recentes tem Mel Gibson no papel de Hamlet. A cena inicial mostra o *espectro* do velho rei sob forma fosforescente e transparente.

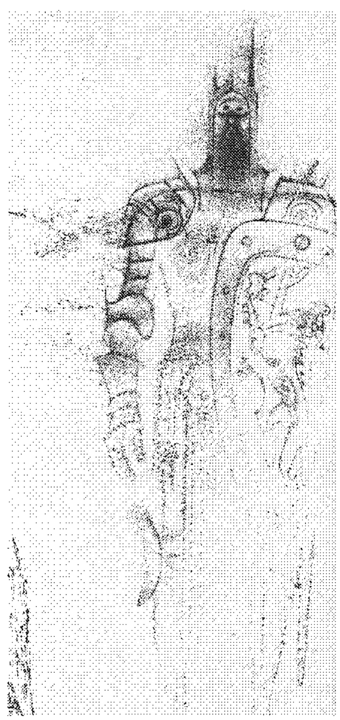


FIGURA 2.1 - O ESPECTRO DO REI HAMLET.

Quando falamos em **espectro eletromagnético**, não estamos falando de fantasmas. Ao contrário, falamos de algo bem concreto. Nas próximas seções você verá o que os dois conceitos têm em comum e, principalmente, no quê são distintos.

2.1.2 ESPECTRO SONORO (OU ACÚSTICO)

Quem resiste apertar pelo menos uma tecla estando perto de um piano? Se apertarmos a 29ª tecla da esquerda para a direita (tecla lá, 3ª oitava), o som produzido é uma vibração de 440 ciclos por segundo. Mais tecnicamente, dizemos que a **freqüência** da onda sonora correspondente ao $lá_3$ é 440 Hertz, ou 440 Hz. As outras teclas nesta mesma oitava dão sons de 262 Hz ($dó_3$), 294 Hz ($ré_3$), 330 Hz (mi_3), 349 Hz ($fá_3$), 392 Hz (sol_3), 494 Hz (si). Para obter as freqüências das notas nas outras oitavas do piano, é só lembrar que de uma oitava para a oitava seguinte a freqüência dobra. Assim, o $dó_4$ tem 524 Hz de freqüência.

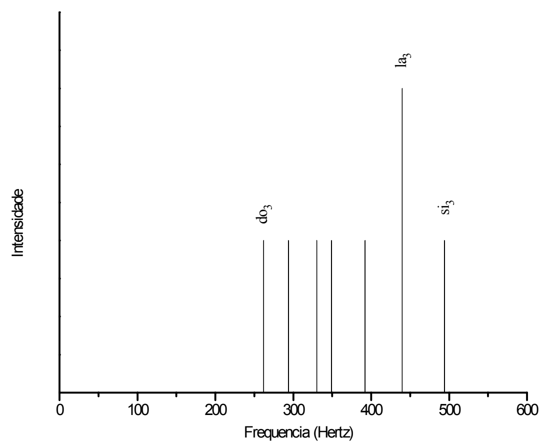


FIGURA 2.2 - O ESPECTRO ACÚSTICO DE UM PIANO EM TORNO DA 3ª OITAVA.

A Figura 2.2 mostra o espectro acústico do piano em torno da 3ª oitava. O eixo horizontal representa as freqüências, o eixo vertical, a intensidade do som. Note que se você golpear mais forte uma das teclas, o piano soará mais alto. Isso está representado na figura para a nota $lá_3$. A Figura 2.3 mostra o que aconteceria se tivéssemos um aparelho capaz de registrar a vibração das cordas do piano em um centésimo de segundo. Note que nesse intervalo de tempo o $lá_3$ executa 440/100 = 4,4 oscilações.

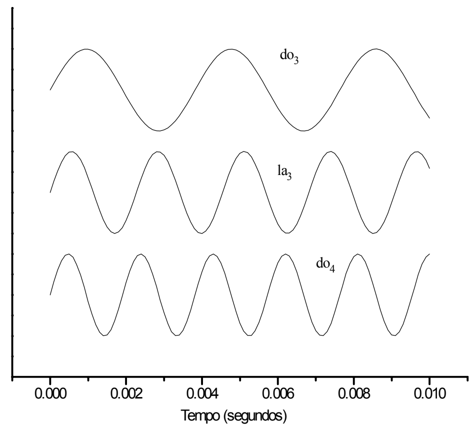


FIGURA 2.3 - AS ONDAS ACÚSTICAS CORRESPONDENTES AO ESPECTRO SONORO DA FIGURA. 2.2.

Exercício: Tente imaginar como seria o espectro sonoro de uma apresentação ao vivo do Guns'n'Roses.

2.1.3 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Agora fica mais fácil visualizar o que é espectro eletromagnético. É um conceito semelhante ao mostrado nas Figs. 2.2 e 2.3, com a diferença que as vibrações não são mecânicas, como as das cordas do piano, mas vibrações **elétricas e magnéticas**. Quando dizemos que a rádio Tabajara transmite em AM na freqüência de 780 quilohertz, estamos dizendo que na antena transmissora dessa rádio, existe corrente elétrica viajando de um lado para outro com freqüência de 780 mil ciclos por segundo! Essa vibração produz ondas eletromagnéticas que deixam a antena e se propagam pelo espaço. Um receptor de rádio é capaz de captar essas ondas, de modo análogo ao nosso ouvido, que é capaz de captar o som do piano mesmo que estejamos longe dele.

Na Figura 2.4 é mostrado esquematicamente o espectro eletromagnético na faixa de FM em São José dos Campos. Note que foram deixadas muitas emissoras de fora, querendo expressar um profundo desejo de que não existissem.

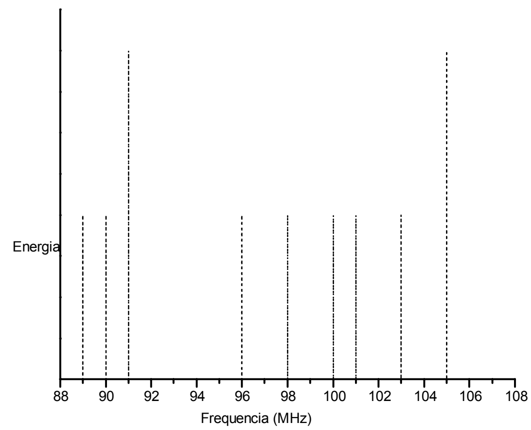


FIGURA 2.4 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO NA REGIÃO DE FM (88 A 108 MHZ).

Do mesmo modo que para as ondas sonoras, a freqüência das ondas eletromagnéticas também varia. E muito. Por volta de 1 milhão de Hertz temos as rádios AM. Entre 88 milhões de Hertz (de forma mais compacta, 88 Megahertz ou 88 MHz) e 108 MHz temos as freqüências onde operam as emissoras de FM. Telefones celulares operam em freqüências de quase 1 bilhão de Hertz (1 Gigahertz ou 1 GHz). A Figura 2.5 identifica outras formas de radiação eletromagnética. Note que nessa figura foi usada uma forma compacta de expressar os números enormes que aparecem quando falamos da freqüência das ondas eletromagnéticas. A lógica é simples, veja: 1000 Hz = 10^3 Hz, 10000 Hz (10 kHz) = 10^4 Hz, 1 MHz = 10^6 Hz, 1 GHz = 10^9 Hz. A luz que nos ilumina tem freqüência entre 10^{14} e 10^{15} Hz.

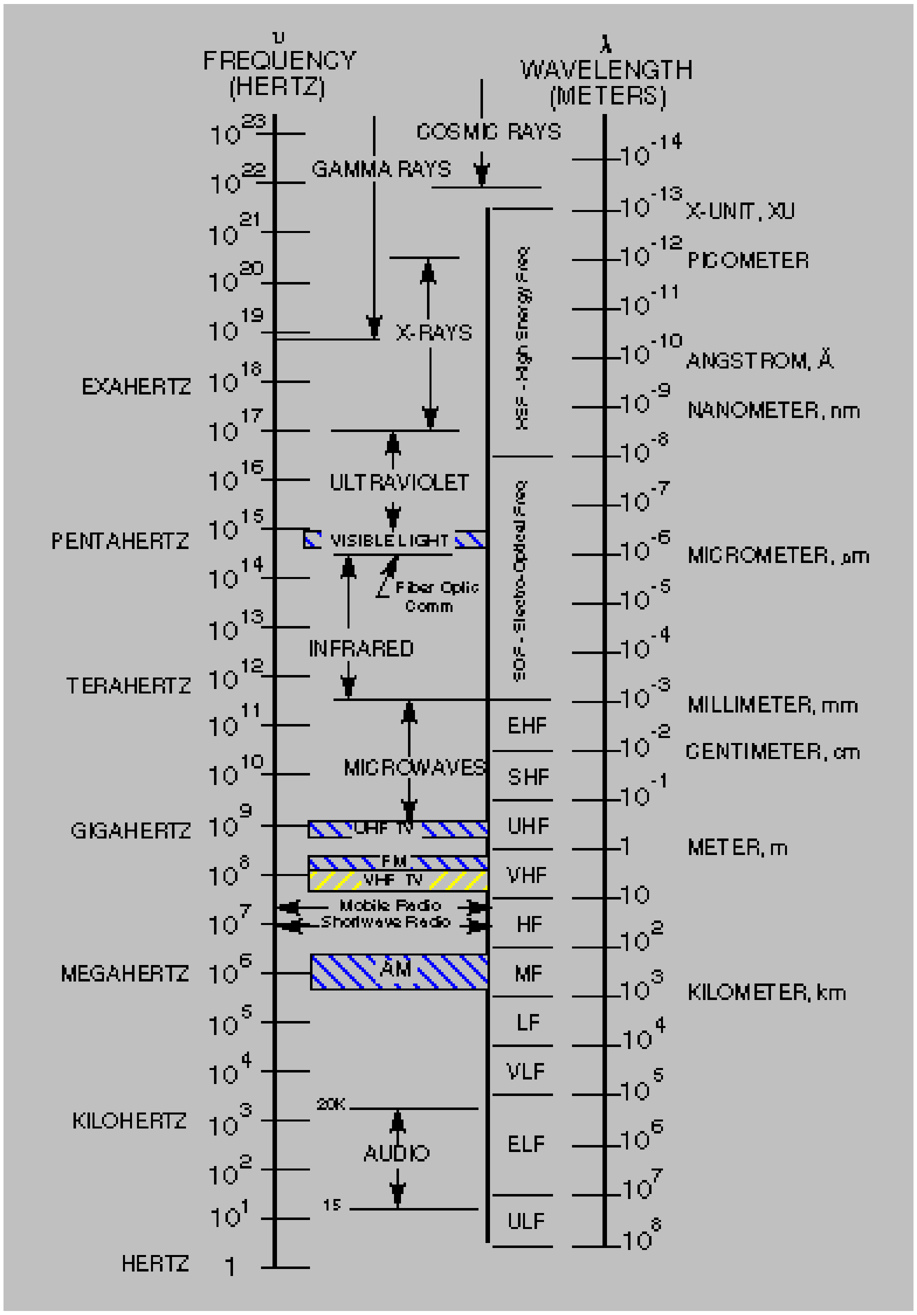


FIGURA 2.5 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.

O espectro emitido por uma fonte de radiação eletromagnética não precisa ser confinado a freqüências bem definidas, como mostrado na Figura 2.4. A maioria dos objetos no céu emite em faixas amplas de freqüência. Tecnicamente isso se chama de espectro "contínuo". A analogia com o piano seria a seguinte: essas fontes se comportam como se fossem um piano eletromagnético de um número enorme de teclas, todas elas sendo tocadas ao mesmo tempo.

A Figura 2.6 mostra uma boa aproximação ao que é o espectro eletromagnético das estrelas: quanto maior é a temperatura mais energia é emitida por unidade de área e mais deslocado para o azul é o máximo do espectro. Os espectros reais diferem dos espectros mostrados na Fig. 2.6 pela presença de absorções e emissões localizadas devido aos elementos químicos que compõem as estrelas.

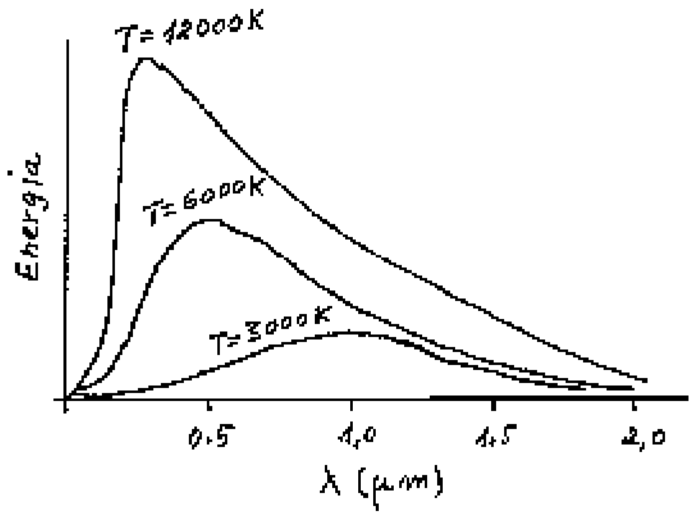


FIGURA 2.6 - O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO DE MATERIAIS A DIFERENTES TEMPERATURAS.

Para quem gosta de saber coisas mais avançadas, aqui vão duas fórmulas que são muito usadas em Física, Engenharia e Astronomia:

1) Relação entre a distância entre uma vibração e outra (comprimento) da onda eletromagnética e a freqüência:

comprimento de onda (metros)= velocidade da luz (m/s) / freqüência (Hz)

Numa forma mais compacta, usando símbolos matemáticos, podemos escrever:

$$\lambda = \mathbf{c} / \nu \qquad \textbf{(2.1)}$$

Exemplo: O que meu pai queria dizer quando dizia que ouvia a Rádio Gaúcha na faixa de 49 metros?

Resposta: Estava querendo dizer que essa rádio, transmitindo em 6 MHz, emite ondas eletromagnéticas cujos picos de intensidade são afastados uns dos outros por uma distância igual a

comprimento de onda = 300.000.000 / 6.000.000 = 49 m

A fórmula acima contém uma informação muito importante: toda onda eletromagnética se propaga à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s, ou 3×10^8 m/s.

2) Energia das ondas eletromagnéticas

Uma das grandes descobertas da Física é a de que podemos entender as ondas eletromagnéticas como “pedacinhos” de onda (pacotes de onda) cada um carregando uma certa quantidade de energia:

Energia (Joule) = 6.6×10^{-34} × freqüência (Hz)

ou, em forma matemática,

$$\mathbf{E = h\,\nu} \qquad \textbf{(2.2)}$$

sendo h o símbolo para a **constante de Planck.**

Exemplo: A Rádio Bandeirantes irradia 660 kW de energia em ondas eletromagnéticas na freqüência de 1 MHz. Quantos “pacotinhos” de radiação eletromagnética isso dá por segundo?

Resposta: 660 kW é o mesmo que 660.000 Joule/segundo. Então o número de pacotes é

$660.000 / (6.6 \times 10^{-34} \times 10^{6}) = 10^{33}$ pacotes !!!

2.1.4 ESPECTRO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Existe um outro tipo de onda na natureza que é diferente das ondas sonoras e das ondas eletromagnéticas. São as **ondas gravitacionais**. Elas também se propagam com a velocidade da luz, mas em vez de serem produzidas por cargas elétricas em movimento, são produzidas por **massas em movimento**. Essas ondas ainda não foram detectadas diretamente, mas isso deverá acontecer nas próximas décadas. Uma fonte importante de ondas gravitacionais são os sistemas binários do tipo Terra-Lua ou estrela-estrela. Pode-

se dizer que a nossa Galáxia é um imenso piano com alguns bilhões de teclas, cada uma delas constantemente apertadas produzindo ondas gravitacionais cuja freqüência é proporcional à freqüência com que a binária gira. O estudo do espectro das ondas gravitacionais é um dos desafios para os astrofísicos do século 21.

2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E SEUS EFEITOS SOBRE O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

2.2.1 O MEIO AMBIENTE E O ESPECTRO ACÚSTICO

Os moradores da Vila São Benedito que tentaram ouvir as músicas cantadas por Chitãozinho e Xororó durante o Vale Rodeio perceberam que a intensidade do som diminui muito à medida que o observador se afasta da fonte sonora. É muito difícil ouvir um piano a um quilômetro de distância, por mais quieto que seja o ambiente. A razão é explicada na Fig. 2.7, em que uma pedra é jogada num lago e um barquinho, colocado à diferentes distâncias, é chacoalhado pela onda que se propaga. Note que quando o barco está distante, a fração do círculo interceptado pelo barco diminui. De modo geral, a energia recebida por um detetor de ondas **diminui com a distância à fonte**. Se a fonte emite em **todas as direções no espaço**, a energia **diminui com o quadrado da distância à fonte**.

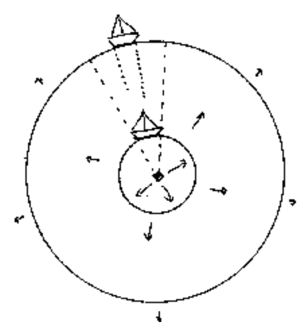


FIGURA 2.7 - A DILUIÇÃO DA ENERGIA DA ONDA COM A DISTÂNCIA À FONTE.

O observador perspicaz percebe também que certas freqüências sonoras são mais atenuadas que outras. Isso quer dizer que devem existir outros fatores que produzem diminuição da intensidade das ondas. Um deles é a **absorção**. Um exemplo de absorção

entre o observador e a fonte de ondas sonoras é uma parede. No caso de edifícios de apartamentos, nem sempre a absorção suprime completamente o som.

2.2.2 A ATMOSFERA DA TERRA E O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

As ondas eletromagnéticas sofrem efeitos parecidos com os descritos para as ondas sonoras. Para começar, a quantidade de energia que chega até nós cai com o quadrado da distância. Veja Alfa Centauri, por exemplo. É uma estrela mais ou menos como o Sol, mas pelo fato de estar a 4,3 anos luz de distância, a quantidade de energia que chega até nós é

$$(\text{distância [Alfa Centauri]}/\text{distância [Sol]})^2 = (4\times10^{16}\ \text{m}/1{,}5\times10^{11}\ \text{m})^2 = 7\times10^{10}$$

ou seja, 70 bilhões de vezes menor que a recebida de nosso Sol.

A radiação eletromagnética também é absorvida pela atmosfera. No caso da luz, isso é bem fácil de ver com o seguinte exemplo. Ao meio-dia, não conseguimos olhar para o Sol (mesmo que conseguíssemos, não seria saudável faze-lo). Mas ao por-do-Sol, é muito fácil faze-lo. É que ao entardecer a luz tem que atravessar um caminho muito mais longo dentro da atmosfera e sofre maior atenuação. Veja esquematicamente na Figura 2.8 como isso acontece. A luz também sofre atenuação diferente em freqüências diferentes. A luz vermelha é menos atenuada que a luz azul, de modo que vemos o Sol avermelhado ao entardecer porque só a luz vermelha chega até nós. O principal processo físico em jogo nesse caso é o **espalhamento**, que explica também a cor azul do céu sem nuvens. A luz pode ser atenuada também por **absorção pura** em raias atômicas ou bandas moleculares. Nesse caso, as freqüências envolvidas são muito bem definidas e representam uma espécie de "impressão digital" do átomo ou molécula que a produziu.

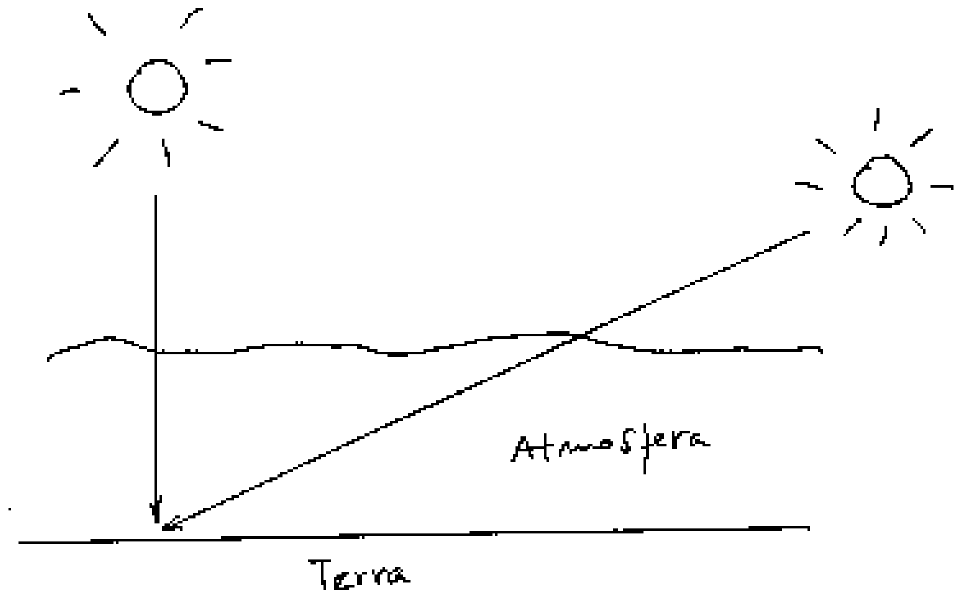


FIGURA 2.8 - A ATENUAÇÃO DA LUZ DENTRO DA ATMOSFERA TERRESTRE.

Algumas moléculas na nossa atmosfera absorvem quase toda a radiação que chega de fora em certas faixas de freqüência, de modo que muito pouco chega até o chão. Isso tem importância vital para os seres que povoam a Terra. A molécula composta por tres átomos de Oxigênio (chamada Ozônio) bloqueia a luz ultravioleta que em excesso, é mortal aos seres vivos (os dentistas usam lâmpadas ultravioleta para desinfetar suas ferramentas de trabalho). Há uma grande preocupação hoje em dia com os efeitos da destruição da barreira protetora de Ozônio que envolve a Terra, em virtude de reações químicas com produtos produzidos pelo homem.

Se por um lado estamos vivos porque a atmosfera da Terra nos proteje das radiações nocivas, por outro, a própria atmosfera impede que observemos do solo certas freqüências do espectro eletromagnético, emitidas pelos corpos celestes. Isto ocorre no ultravioleta, raios X, raios-gama, infravermelho e rádio. A Figura 2.9 mostra as "janelas" no espectro eletromagnético pelas quais podemos observar o Universo a partir de observatórios no chão. Para observar a radiação eletromagnética nas regiões absorvidas pela atmosfera a única solução é colocar o "observador" fora dela! Essa é uma das razões pelas quais o Telescópio Espacial Hubble foi colocado em órbita. O

INPE opera um centro de lançamento de balões que consegue levar instrumentos a mais de 40 km de altura, deixando para trás 99% da atmosfera.

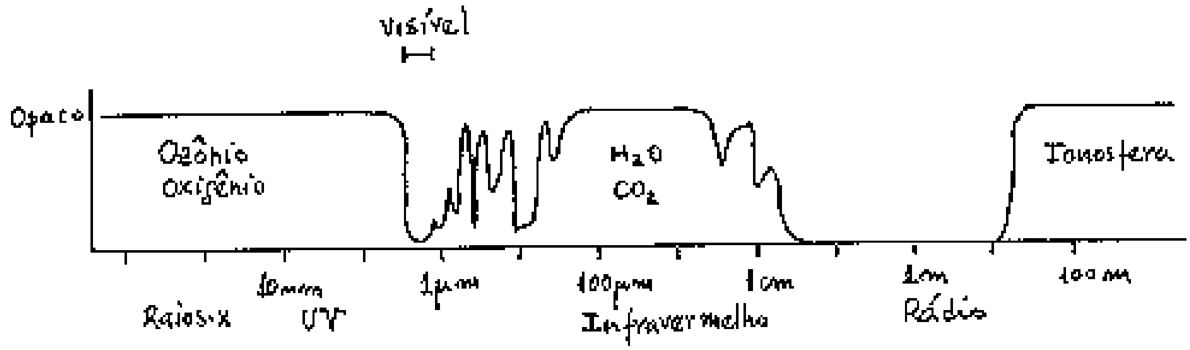


FIGURA 2.9 - AS JANELAS DE OBSERVAÇÃO A PARTIR DO SOLO.

2.3 DETETORES E TELESCÓPIOS

2.3.1 DETETORES DE ONDAS SONORAS

A Figura 2.10 mostra um detetor de ondas sonoras, o ouvido. Note que a orelha não tem um papel significativo na detecção dos sons. É o ouvido, em particular o tímpano, que tem essa função. O tímpano é uma espécie de membrana, como a membrana de um tambor, que vibra quando atingida pelas compressões de ar produzidas por ondas sonoras.



FIGURA 2.10 - UM DETETOR DE ONDAS ACÚSTICAS.

A vibração do tímpano é processada pelo nosso cérebro que analisa o espectro de freqüências. Combinando os sinais de dois detetores (um ouvido de cada lado da cabeça) o cérebro é capaz de saber a orientação da fonte de sons. Caso o detetor perca a

sensibilidade, como ocorreu com o meu avô à medida que foi envelhecendo, é possível realizar uma compensação como a mostrada na Figura 2.11 (a). O objetivo desse aparelho é aumentar a área coletora de ondas acústicas. Uma outra solução para o mesmo problema é mostrada na Fig. 2.11 (b): em vez de aumentar a área coletora, o sinal recebido é *amplificado* por um circuito eletrônico.

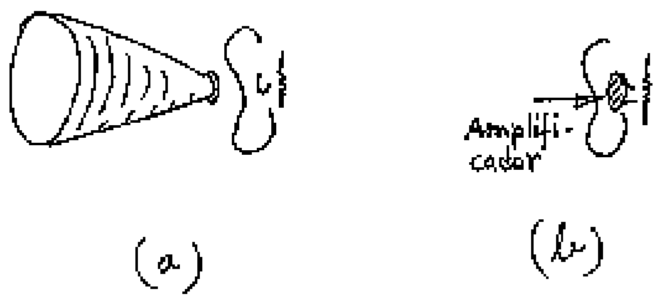


FIGURA 2.11 - AUMENTANDO A SENSIBILIDADE DO DETETOR DE ONDAS SONORAS.

Embora o ouvido humano seja um detetor magnífico, ele é superado por detetores como os microfones que podem registrar sons de freqüências mais altas e mais baixas que as que conseguimos ouvir. Podem registrar também intensidades sonoras maiores e menores do que as que conseguimos captar com o ouvido.

2.3.2 DETETORES E TELESCÓPIOS PARA ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

O detetor mais aprimorado que possuímos é o olho. A combinação olho+cérebro faz simultaneamene uma análise do espectro da luz e sua distribuição espacial e de intensidade. O olho produz imagens. O princípio de detecção é baseado em células especializadas que enviam sinais elétricos ao cérebro quando são atingidas por luz.

Como vimos antes, o espectro eletromagnético cobre uma vasta faixa de freqüências. O princípio de detecção pode ser diferente para diferentes freqüências. Nos detetores de ondas de rádio, por exemplo, o que se mede é o deslocamento de cargas elétricas num condutor, na presença da onda eletromagnética. Esse condutor se chama antena e pode ter formas variadas, mas o objetivo é sempre o mesmo, oferecer uma área exposta à

onda eletromagnética. Quanto maior a área da antena, mais energia eletromagnética pode ser captada. O INPE opera um rádiobservatório que possui uma antena parabólica de 13 metros de diâmetro capaz de observar ondas de rádio em freqüências de dezenas de gigahertz.

Nas freqüências correspondentes à luz visível, os detetores são capazes de registrar os pacotes individuais de energia associados às ondas eletromagnéticas. Esses pacotes são chamados de **fótons**. O detetor que existe dentro de uma câmara de vídeocassete tem semelhança com o detetor no nosso olho, ou seja, é capaz de registrar e discriminar luz de freqüências diferentes, e pelo fato de ser dividido em muitas células básicas, pode fornecer informação da direção da fonte emissora de luz.

Mas, para que então precisamos de telescópios? Não bastaria o detetor sozinho para registrar a intensidade, freqüência e direção da radiação eletromagnética? A resposta está relacionada com o exemplo da Fig. 2.11 (a). Em Astronomia é quase a regra estarmos na situação do surdo -- não por falta de sensibilidade do detetor, uma vez que os mais elaborados sistemas de amplificação (Fig. 2.11b) são utilizados -- mas porque as fontes celestes de radiação são extremamente fracas. A única maneira de remediar é aumentar a área coletora de radiação. Esses aparelhos se chamam genericamente de **telescópios** ou **antenas**, conforme a faixa do espectro que estiver sendo estudada. Na Divisão de Astrofísica do INPE existem pesquisas em andamento utilizando telescópios para ondas de rádio, para luz visível, para raios X e até mesmo para ondas gravitacionais!

A Figura 2.12 ilustra os problemas que encontramos quando tentamos determinar a intensidade, e direção da radiação eletromagnética com um mesmo instrumento.

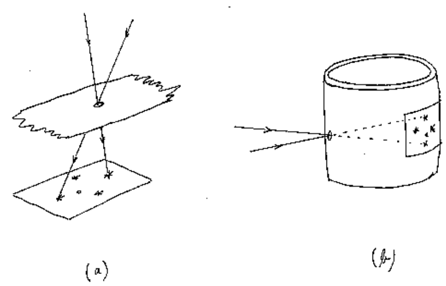


FIGURA 2.12 - DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

A Fig. 2.12 (a) mostra o "telescópio" mais simples que pode ser construído. Ele funciona tanto para ondas de rádio quanto para luz, raios X ou raios gama. O único requisito é que as dimensões da abertura sejam bem maiores que o comprimento de onda da radiação. Esse tipo de montagem já teve muita popularidade em um contexto não científico. Antes do advento da fotografia as "câmaras obscuras" eram utilizadas para projetar imagens em vidros despolidos (foscos) e servir de guia para o artista na pintura de panoramas. Quanto menor for a razão entre o tamanho da abertura e a distância ao detetor, mais detalhe o instrumento é capaz de discernir. A maior desvantagem desse tipo de "telescópio" é que a área coletora é muito pequena. A Fig. 2.12 (b) mostra como você pode montar uma câmara escura para demonstração em sala de aula. Lembre que para esse tipo de aparelho funcionar bem é importante que a tela semitransparente receba o mínimo possível de luz externa. Na Divisão de Astrofísica do INPE está sendo construído um telescópio de raios X que utiliza o princípio de funcionamento da câmara escura. Para melhorar sua capacidade de captar energia o anteparo de entrada contém uma grande quantidade de furos e as imagens completamente embaralhadas que são projetadas na tela de saída são separadas através de um programa no computador.

Galileo Galilei foi o responsável pela divulgação de uma invenção que resolveu os problemas de registrar a direção de chegada da luz e ao mesmo tempo, captar o máximo de luz possível. Trata-se do uso de uma *lente*. A lente é capaz de ter uma área coletora muito maior que a da abertura circular mostrada na Fig. 2.12, mantendo a capacidade de

separar raios vindos de direções diferentes. Nas lojas de "1,99" você pode comprar uma lupa de plástico que permite fabricar o telescópio mostrado na Figura 2.13.

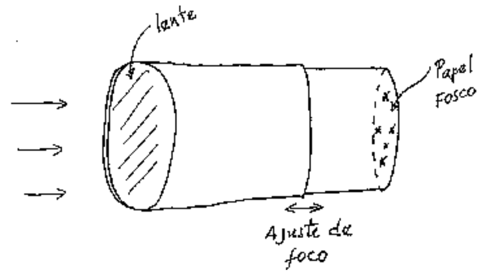


FIGURA 2.13 - UM TELESCÓPIO PARA DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DIREÇÃO DA RADIAÇÃO DE FONTES CELESTES.

Para determinar o comprimento do canudo que compõe a parte externa do telescópio, meça primeiro a distância da lente em que uma fonte de luz (lâmpada dentro de casa) forma uma imagem bem definida. Se você utilizar dois canudos, um podendo se deslocar com relação ao outro, pode focalizar precisamente seu instrumento. Se em vez do papel semitransparente você tivesse um filme fotográfico na parte posterior do dispositivo, o aparelho se chamaria "câmara fotográfica".

O telescópio de 1,6 m de diâmetro no Laboratório Nacional de Astrofísica, em Brazópolis, MG, funciona exatamente segundo o mesmo princípio, apenas que em vez de uma lente para focalizar a luz, possui espelhos. Os espelhos são vantajosos porque não absorvem luz como as lentes, e podem ser construídos com dimensões muito grandes. O Brasil é sócio, com uma fração de 2,5% do capital, de dois telescópios de 8 metros de diâmetro cada um. Trata-se do Projeto Gemini que envolve os Estados Unidos, Inglaterra, Chile, Argentina e Brasil. Um dos telescópios funcionará nos Andes chilenos e o outro numa montanha de 4200 m de altitude, no Havaí.

Exercício: Quantas vezes mais luz um telescópio do Projeto Gemini é capaz de captar com relação ao telescópio instalado em Brazópolis?

Resposta: A capacidade de captar radiação é proporcional à area. A área de um círculo é igual a $0{,}787 \times (\text{diâmetro})^2$. Então,

Gemini / Brazópolis = $0{,}787 \times 8^2 / (0{,}787 \times 1{,}6^2) = 25$ vezes mais luz.

Capítulo 3

O SISTEMA SOLAR*

Cláudia Vilega Rodrigues**

* Revisado em Março/2001.

** e-mail: claudia@das.inpe.br

O SISTEMA SOLAR

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

3.1 INTRODUÇÃO

O sistema solar é formado pelo Sol, planetas e seus satélites – como a Terra e a Lua -, outros corpos menores – como cometas e asteróides -, além do meio interplanetário. O que são esses astros? Quais são seus tamanhos? Como se movimentam? Do que são formados? Qual sua origem? Nas próximas páginas, vamos apresentar respostas breves a essas perguntas.

Atualmente o Homem já pode responder a algumas dessas perguntas com certa segurança. Nas próximas seções vamos apresentar um pouco do que se conhece sobre o sistema solar.

3.2 A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE O SISTEMA SOLAR

Os astros do sistema solar, principalmente o Sol, estão muito presentes em nosso cotidiano. A maneira como medimos o tempo, a nossa percepção visual e a nossa própria existência estão diretamente ligadas às condições existentes no sistema solar. A nossa visão está adaptada ao tipo de radiação eletromagnética – luz visível - que é capaz de penetrar a nossa atmosfera (veja Capítulo 2). Essa radiação é também a mais emitida pelo Sol. A escala de tempo que utilizamos em nosso cotidiano é baseada nos ciclos do Sol e da Lua. Até mesmo a energia encontrada na superfície terrestre é, em sua maior parte, proveniente do Sol.

Uma das questões fundamentais da Humanidade é entender o Universo que a cerca e do qual faz parte. O sistema solar, até há poucos séculos, constituía todo o Universo conhecido. É relativamente recente a noção de que as estrelas que vemos no céu são astros similares ao Sol; mas muito mais distantes. Como já foi dito no Capítulo 1, a observação do céu noturno, ainda na Antigüidade, mostrou ao Homem que alguns astros se movimentam contra um fundo de "estrelas fixas". Esses objetos celestes foram chamados planetas, isto é, astros errantes, pois planeta vem do grego e significa errante. São eles: a Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. Hoje o significado da

palavra planeta é diferente, e não mais chamamos a Lua de planeta. Mas, o que é a Lua? E o que são os hoje chamados planetas? Isso ficará claro na Seção 3.3.

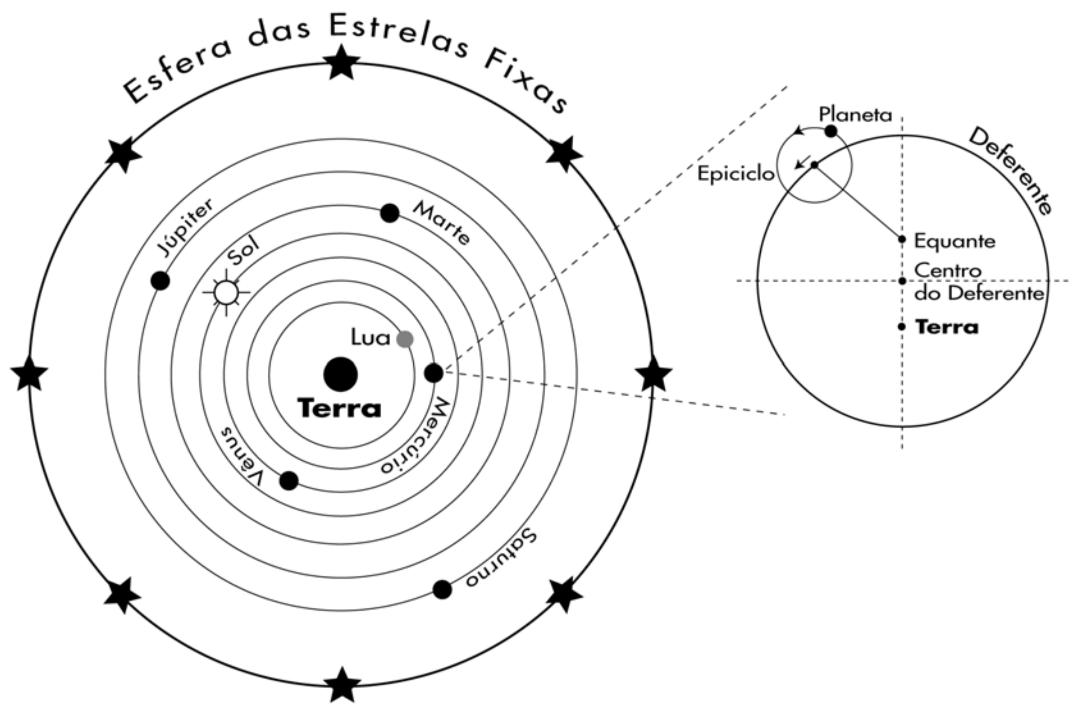


FIGURA 3.1 - O MODELO GEOCÊNTRICO.

Muito se pensou sobre a distribuição e a organização dos astros no céu. O modelo que dominou o pensamento filosófico europeu até o século XVI é o chamado modelo geocêntrico. Geo, em grego, significa Terra. Assim, geocêntrico significa que coloca a Terra no centro. Esse modelo foi sistematizado por Ptolomeu (astrônomo, matemático e geógrafo) no século II, a partir de idéias preexistentes. Nesse modelo a Terra era o centro do Universo e em torno dela orbitavam os astros que citamos há pouco, além do Sol. Quanto maior o tempo gasto para um planeta dar uma volta completa ao redor da Terra - isto é, retornar ao mesmo ponto do céu em relação às estrelas fixas - maior era a sua distância. Assim, pensava-se que a ordem dos planetas era a da Figura 3.1, que apresenta um esboço em duas dimensões do modelo geocêntrico. As estrelas fixas ficavam todas a uma mesma distância, maior do que a do planeta considerado o mais distante na época, Saturno. Para explicar corretamente os movimentos e brilhos

observados dos planetas, o modelo geocêntrico necessitava de uma série de complicações geométricas, como os eqüantes e deferentes.

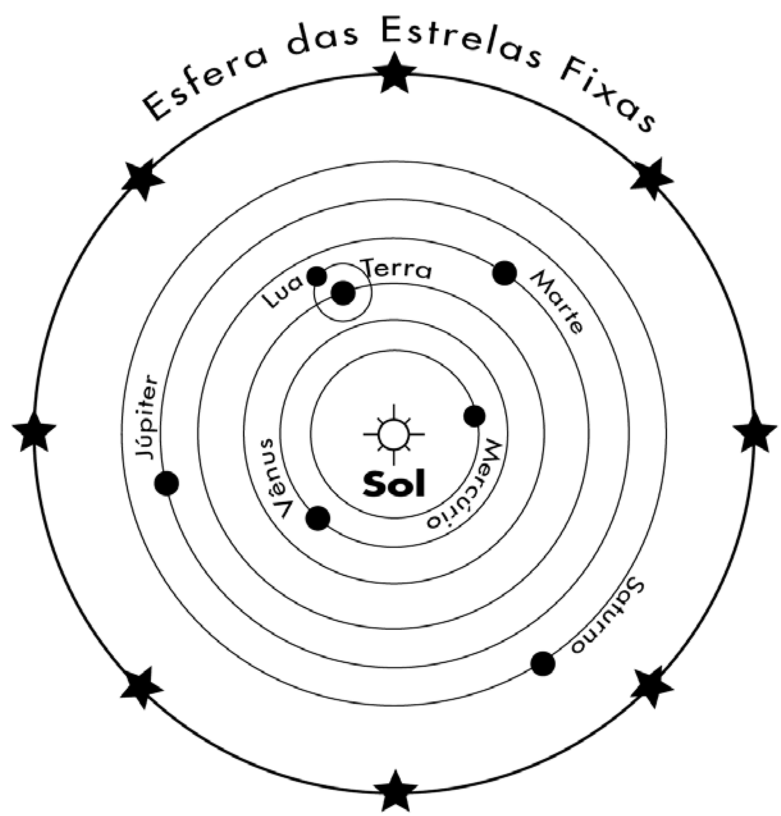


FIGURA 3.2 - O MODELO HELIOCÊNTRICO.

Com o objetivo de explicar com mais simplicidade o movimento dos planetas, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) propôs, em 1543, o modelo heliocêntrico: Hélio, em grego, significa Sol. Nesse modelo o Sol encontrava-se no centro e os planetas orbitavam ao seu redor. A única exceção era a Lua, que continuava orbitando em torno da Terra (veja a Figura 3.2). Um modelo em que o Sol ficaria no centro do Universo já tinha sido proposto por Aristarcos de Samos (281 a.C.) e Nicolas de Cusa (1401-1464), porém, sem maiores repercussões. O modelo heliocêntrico não era apenas mais simples: ele também explicava várias supostas coincidências do modelo geocêntrico de modo natural. Além disso, Copérnico determinou os raios e períodos das órbitas dos planetas com uma precisão muito boa, apesar de considera-las circunferências.

O astrônomo e físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), no início do século XVII, foi o primeiro a observar o céu com o auxílio de um telescópio. Entre as suas descobertas estão as fases de Vênus e os satélites de Júpiter. Essas observações corroboravam o modelo heliocêntrico. Esse modelo tirava a Terra e, portanto o Homem, do centro do Universo. Além disso, Galileu obteve vários resultados experimentais sobre os movimentos dos corpos que ajudaram a compor a base do trabalho de Newton (veja adiante).

O modelo de Copérnico, porém, ainda possuía problemas. Ele considerava as órbitas dos planetas circunferências perfeitas e para explicar corretamente os movimentos observados eram necessários artifícios geométricos, exatamente como acontecia com o modelo geocêntrico. Foi o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), no início do século XVII, quem mostrou que as órbitas planetárias eram elípticas. Para isso, ele contou com as observações do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601), do qual foi assistente durante o último ano de vida e seu sucessor como responsável pelo observatório de Uraniborg. Os dados obtidos por Tycho Brahe eram os mais precisos da época e no limite do que o olho humano, sem auxílio de instrumentos, pode conseguir. E foi tentando explicar esses dados – que não eram compatíveis com o modelo de Copérnico – que ele propôs três leis que descrevem corretamente os movimentos dos planetas (veja Seção 3.4).

Com o trabalho de Kepler passou-se a saber *como* os planetas se movimentavam ao redor do Sol. Mas ainda restava uma pergunta básica: *por quê?* Foi só com a Teoria da Gravitação Universal do físico e matemático inglês Isaac Newton (1643-1727), publicada em 1687, que isso foi respondido. A teoria da gravitação mostra que os corpos se atraem uns aos outros, isto é, um corpo cria em torno de si um campo gravitacional que é sentido por todos os outros corpos (veja quadro no Capítulo 1). Esse campo gravitacional é tanto mais intenso quanto maior a massa do corpo, e decresce proporcionalmente com o quadrado da distância. Essa é a razão porque a Terra está ligada ao Sol, por exemplo. Mais do que isso, nas escalas astronômicas a força gravitacional é dominante e rege grande parte dos fenômenos celestes. Newton, em sua teoria, também descreveu exatamente como um corpo se movimenta quando sujeito a

uma certa força, qualquer que seja sua natureza. Com esses dois fundamentos foi possível entender a dinâmica do sistema solar. Em "Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural", o "Principia", Newton não só demonstra as leis de Kepler e calcula fenômenos conhecidos como as marés e a precessão dos equinócios, mas também prevê e determina a forma achatada da Terra. A partir daí, estava aberto o caminho para o desenvolvimento da astronomia moderna.

Desse modo, no final do século XVIII, os movimentos dos maiores corpos do sistema solar eram explicados tanto do ponto de vista de sua descrição, como de sua causa. Porém, como o sistema solar surgiu? O filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) foi o primeiro a propor a hipótese nebular em 1755, que foi posteriormente desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace (1749-1827). Ela considera que o sistema solar formou-se a partir de uma nuvem de gás e poeira em rotação (veja a Seção 3.5). Apesar de outras teorias terem surgido, esta é ainda a teoria mais aceita sobre a formação do sistema solar e do Sol e é corroborada por observações de outras estrelas.

No momento, estamos passando por uma nova fase do conhecimento do sistema solar: estamos descobrindo planetas em torno de outras estrelas - veja a Seção 3.6. Essas novas descobertas irão ampliar ainda mais o nosso horizonte sobre as nossas origens.

3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O sistema solar inclui o Sol e os planetas, mas abrange bem mais do que isso. Como podemos definir o que é e como é composto o sistema solar? No Universo, a distribuição e hierarquia dos objetos são regidas basicamente pela força gravitacional. Como o Sol é formado por uma grande quantidade de matéria concentrada em uma região relativamente pequena, ele é um foco de atração que reúne em torno de si vários corpos (planetas, asteróides, cometas, etc.). Assim, uma das definições para o sistema solar é: o conjunto de todos os corpos (ou matéria) cujo principal centro de atração é o Sol. Ela não é a única, porém, a consideramos a melhor.

Como já mencionado várias vezes ao longo desta apostila, a força gravitacional mantém dois corpos unidos. Vamos considerar, por exemplo, a Terra e a Lua. Sabemos que é a força gravitacional que as mantém unidas, mas, se a força é de atração e na direção da

linha que une os seus centros, por que, então, esses dois corpos não colidem? Isso acontece devido à rotação. A quantidade de rotação de um corpo com relação a um ponto é medida por uma grandeza chamada *momento angular*.

A maior parte da massa do sistema solar está concentrada no Sol (99,86%!!!). Já o seu momento angular está praticamente distribuído nos planetas. Estes giram em torno do Sol no mesmo sentido que o Sol gira em torno de si mesmo, ou de seu eixo. Falando em linguagem astronômica, o sentido de rotação do Sol é o mesmo da translação dos planetas. Esse sentido é chamado prógrado. Mas nem todos os planetas rotacionam (giram em torno de si mesmos) nesse mesmo sentido. O sentido de rotação de Vênus e Urano é contrário ao sentido prógrado, isto é, a rotação desses corpos é retrógrada.

No parágrafo anterior dissemos que os planetas giram em torno do Sol. Isto não é absolutamente correto. Os planetas giram em torno do centro de massa do sistema solar (veja quadro sobre centro de massa no Capítulo 1). Aliás, o próprio Sol, além de sua rotação, também translada em torno desse centro de massa. Em algumas configurações, o centro de massa do sistema solar pode estar a uma distância de dois raios solares do centro do Sol. Porém, na maior parte dos casos essa distância pode ser desprezada e o Sol pode ser considerado o centro do sistema solar.

Uma outra característica do sistema solar é a de que as órbitas dos planetas estão aproximadamente em um mesmo plano, que é o mesmo do equador do Sol; as órbitas são, também, quase circulares. Essas informações são importantes, não apenas para caracterizar o sistema solar, mas também porque devem ser reproduzidas pelos modelos que tentam explicar a sua formação.

Nas últimas décadas, as missões espaciais produziram um grande avanço no conhecimento sobre o sistema solar. Foram elas que proporcionaram grande parte do que será apresentado nas próximas seções.

A seguir, vamos apresentar uma pequena descrição dos componentes do sistema solar.

3.3.1 O SOL

O Sol é, entre os corpos celestes, aquele que mais influencia as nossas vidas. É impossível não notá-lo em um dia claro de verão, ou perceber a sua "ausência" em um

dia chuvoso. Foi chamado de Hélio pelos gregos, Mitras pelos persas e Rá pelos egípcios, para citar algumas culturas. Cinco séculos antes da era Cristã, o grego Anaxágoras (aproximadamente 430 a.C.) sugeriu que o Sol fosse uma bola de fogo, o que guarda uma pálida semelhança com a realidade.

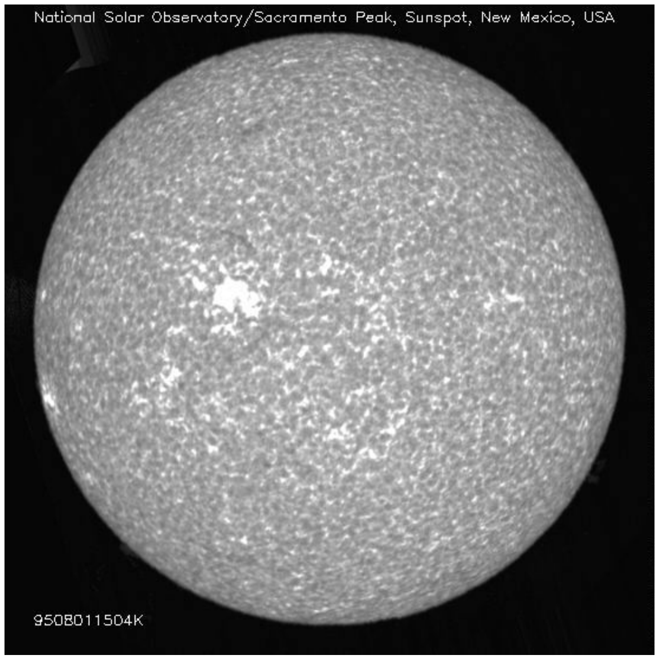


FIGURA 3.3 – IMAGEM DO SOL NA LINHA DE EMISSÃO K DO CaII OBTIDA NO NATIONAL SOLAR OBSERVATORY (NSSDC).

Como já foi mencionado, o Sol é o centro gravitacional do sistema solar. Em torno dele orbitam os outros corpos, e é ele que mantém o sistema coeso. Mas, o que é o Sol? O Sol é uma estrela. Dentre as estrelas existentes no Universo, o Sol pode ser classificado como uma estrela típica, das mais comuns que existem no Universo. O Capítulo 5 fala com mais detalhes sobre as estrelas. Por ser uma estrela, o Sol é uma fonte de energia. De toda energia existente na superfície da Terra, a maior parte é proveniente do Sol que fornece 99,98% dela. O brilho dos corpos do sistema solar é constituído, basicamente, pela reflexão da luz solar em sua superfície.

O Sol é uma massa que se mantém coesa pela sua própria força de gravidade. O mesmo ocorre com os planetas. Por que a diferença, então? A resposta é que o Sol possui uma

massa muito grande. Quão grande? Grande o suficiente para que a contração provocada pela força da gravidade torne tão altas as densidades e temperaturas em seu centro que passam a ocorrer as reações de fusão nuclear, com enorme produção de energia. É esse processo que caracteriza uma estrela e que não ocorre nos planetas. Veja mais detalhes sobre estrelas no Capítulo 5.

O Sol é uma esfera gasosa cuja temperatura na superfície é de cerca de 5 500 centígrados. No núcleo solar a temperatura atinge 15 milhões de graus. Sua massa é 333 mil vezes maior que a da Terra, mas a sua densidade média é de apenas 1,41 gramas por centímetro cúbico, pouco maior que a da água que é de 1 grama por centímetro cúbico. Sua massa é composta por 73% de hidrogênio, o primeiro elemento químico da tabela periódica, e também o mais abundante no Universo. O restante é constituído basicamente por hélio. Apenas 0,1 % da massa do Sol é composta por elementos mais pesados. A Tabela 3.1 mostra alguns dados relativos ao Sol.

TABELA 3.1 - ALGUNS DADOS SOLARES (FONTE: NSSDC)*.

Massa	332.950 massas terrestres
Raio médio	109,2 raios terrestres
Densidade média	1,408 gramas por centímetro cúbico
Densidade central	162,2 gramas por centímetro cúbico
Período de rotação	609,12 horas (cerca de 25 dias)
Distância média à Terra	149,6 milhões de quilômetros

*Veja na Tabela 3.4 os valores relativos à Terra.

É no núcleo solar, com sua altíssima temperatura, que ocorrem as reações nucleares de produção de energia. Essa energia é transportada até a superfície através de camadas que envolvem o núcleo, denominadas envoltórios. Na camada logo abaixo da superfície solar ocorre o processo de convecção do gás que aflora à superfície. A convecção é uma das formas pelas quais a energia é transportada de um local para outro (ver quadro sobre Formas de Transporte de Energia). As porções mais internas do gás, aquecidas pela

radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem, tornam-se mais densas e pesadas, voltando a descer. É devido a esse processo, chamado convectivo, que a superfície do Sol apresenta-se coberta por grãos. Observando-se a superfície solar com grande ampliação os padrões de granulação se assemelham às bolhas de gás quente transportando a energia do interior para a superfície.

FORMAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA

Existem três formas de transportar-se energia: por condução, convecção e radiação.

Condução: Quando a sua mão se aquece ao segurar uma chapa de metal quente, a energia está sendo transportada por condução da chapa para sua mão.

Convecção: Quando você esquenta um bule de água para fazer café, inicialmente a energia é transmitida através da água pelo modo condutivo. Porém, em um dado momento, a água de baixo fica muito mais quente que a da superfície e a condução sozinha não dá conta do transporte. Daí a água começa a ferver, isto é, bolhas de água quente sobem do fundo para a superfície. Nesse ponto, temos o transporte convectivo de energia.

Radiação: Uma outra maneira de transportar energia é através da radiação. Vamos voltar ao exemplo da chapa de metal quente. Você também pode aquecer a sua mão sem encostar na chapa. Colocando sua mão perto de um ferro quente, você pode sentir o seu calor. Nesse caso, é a radiação que transporta o calor do ferro para sua mão. A energia que recebemos do Sol é transmitida de forma radiativa, também.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Isso equivale a cerca de 8 minutos-luz, isto é, a luz do Sol demora esse tempo para chegar à Terra. A segunda estrela mais próxima é Próxima Centauri, que se encontra a uma distância 270 mil vezes maior, assim sua luz demora 4 anos e 4 meses para chegar até nós! Pela sua proximidade, podemos estudar o Sol melhor do que qualquer outra estrela do Universo. Mais detalhes sobre a estrutura do Sol são apresentados no Capítulo 4.

3.3.2 OS PLANETAS E SEUS SATÉLITES

Ao observarem continuamente o céu, os antigos perceberam a existência de pelo menos dois tipos de objetos. Enquanto a imensa maioria dos pontinhos brilhantes no céu, as estrelas, possuía posições relativas imutáveis, alguns poucos pontos pareciam passear por entre elas. Esses objetos foram chamados planetas, que em grego significa errante. São cinco os planetas observáveis a olho nu: Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno. A Lua também foi considerada um astro errante, mas hoje sabemos que não é um planeta, pela definição atual. A Lua é hoje considerada um satélite. Enquanto um planeta orbita em torno do Sol, um satélite orbita em torno de um planeta. Porém, do ponto de vista de composição e características físicas, os planetas e satélites podem ser muito parecidos em alguns casos.

Ao redor do Sol orbitam nove planetas conhecidos. Em ordem de proximidade média ao Sol são eles: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão. Algumas de suas características orbitais são listadas na Tabela 3.2.

Os planetas podem ser divididos em dois tipos: planetas telúricos (similares à Terra) e planetas jovianos (similares a Júpiter). Os planetas telúricos são: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Os jovianos são: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. Plutão não se enquadra em nenhuma das categorias acima e, como veremos adiante, parece um grande cometa.

Os planetas telúricos são pequenos, de baixa massa e compostos basicamente por elementos pesados. São também chamados de planetas internos por serem os mais próximos ao Sol. Possuem poucos ou nenhum satélite e são desprovidos de anéis. A superfície é sólida e a atmosfera é tênue, comparada com a massa do planeta. Os planetas telúricos apresentam ou apresentaram atividade vulcânica, causando modificações importantes em sua estrutura interna e na superfície.

TABELA 3.2 - ALGUNS DADOS ORBITAIS DOS PLANETAS (FONTE: NSSDC).

Planeta	Semi-eixo maior da órbita*	Excentricidade da órbita**	Período de translação (Anos)	Período de rotação (Dias)	Inclinação da órbita (Graus)
Mercúrio	0,387	0,2056	0,241	58,785	7,0
Vênus	0,723	0,0067	0,615	243,7	3,39
Terra	1,000	0,0167	1,0	1,0	0,0
Marte	1,524	0,0935	1,881	1,029	1,85
Júpiter	5,204	0,0489	11,862	0,415	1,304
Saturno	9,582	0,0565	29,457	0,439	2,485
Urano	19,201	0,0457	84,011	0,720	0,772
Netuno	30,047	0,0113	164,79	0,673	1,769
Plutão	39,24	0,2444	247,68	6,4047	17,16

* O semi-eixo maior da órbita refere-se ao valor relativo ao terrestre.
** Veja Seção 3.4 para definição de excentricidade.

Os planetas jovianos são grandes em dimensão e massa, como Júpiter. Este, por sua vez, é o que mais guarda relação com o Sol. Sua massa está próxima à das menores estrelas. Se esta fosse um pouco maior, o processo de fusão nuclear poderia ocorrer em seu interior e ele seria uma estrela. Os planetas jovianos, também chamados gigantes, são compostos basicamente por hidrogênio e hélio. Por isso, apesar de sua grande massa, são menos densos. Não possuem superfície sólida e sua atmosfera densa. Possuem tipicamente muitos satélites e todos exibem anéis.

A existência de uma atmosfera depende da massa do planeta e de sua temperatura. Esta, por sua vez, depende inicialmente da sua distância ao Sol. Os planetas menores e mais quentes (mais próximos do Sol) têm mais dificuldade em manter uma atmosfera. Por outro lado, os elementos mais leves escapam mais facilmente do planeta. Assim, os planetas telúricos tendem a reter quase que somente elementos mais pesados em sua atmosfera. Já os planetas gigantes conseguem reter uma maior quantidade de material,

inclusive os elementos mais leves. A atmosfera faz diminuir a variação de temperatura na superfície entre o dia e a noite.

Na tabela anterior, os valores de massa referem-se à razão entre a massa do planeta e a da Terra. O mesmo vale para o raio equatorial. O achatamento corresponde à diferença entre os raios equatorial e polar do planeta, em unidades de raio equatorial. Os valores para a Terra podem ser encontrados na Tabela 3.4.

TABELA 3.3 - ALGUNS DADOS FÍSICOS DOS PLANETAS (FONTE: NSSDC).

Planeta	Massa*	Raio Equatorial*	Achatamento
Mercúrio	0,0553	0,383	0,0
Vênus	0,815	0,950	0,0
Terra	1,000	1,000	0,0034
Marte	0,107	0,532	0,0065
Júpiter	317,83	11,21	0,0649
Saturno	95,162	9,449	0,0980
Urano	14,536	4,007	0,023
Netuno	17,147	3,883	0,0171
Plutão	0,0021	0,187	0

* Valor relativo ao terrestre.

Os planetas, de modo geral, não possuem luz própria. A maior parte da energia que irradiam corresponde à luz do Sol que é refletida em sua superfície. Assim, como um farol de bicicleta, tipo olho de gato, parece aceso quando alguma luz incide sobre ele. Porém, existe um pequeno excesso de energia (com relação à recebida pelo Sol) que pode ser de origem gravitacional ou radioativa. Esse excesso é maior nos planetas jovianos.

Apesar de pequena, a energia interna dos planetas telúricos é suficiente para modificar sua aparência através de atividade geológica: vulcanismo e movimentos tectônicos. Outros mecanismos que determinam a aparência da crosta de um planeta ou satélite são:

a erosão, causada pela atmosfera ou hidrosfera; e o crateramento. Este último ocorre em todos os planetas internos e satélites de superfície sólida. Desse modo, a análise da crosta permite determinar a época de formação de um dado terreno e o estado atual de atividade do corpo, como veremos ao descrevermos alguns planetas.

3.3.2.1 MERCÚRIO

Mercúrio é o planeta mais próximo do Sol. Seu nome latino corresponde ao do deus grego Hermes, filho de Zeus. Bastante pequeno, é o segundo menor entre todos os planetas (veja Tabela 3.3). Sua superfície está coberta por crateras resultantes do impacto de corpos menores. Por isso supõe-se que a atividade vulcânica tenha ocorrido apenas no início, até cerca de 1/4 da sua idade atual. Caso houvesse atividade recente, as lavas cobririam e apagariam as crateras. Das inúmeras crateras existentes, destaca-se a Bacia Caloris, com 1.300 quilômetros de diâmetro, quase 1/3 do diâmetro do planeta.



FIGURA 3.4 – MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA MERCÚRIO OBTIDAS COM A SONDA MARINER 10 (NSSDC).

Possui uma atmosfera muito tênue, quase desprezível, por isso existe uma incrível variação da temperatura entre o dia e a noite: de –170 graus (lado oculto do Sol) a +430 graus centígrados (lado iluminado pelo Sol). Compare com a Terra, onde a variação é de poucas dezenas de graus. Sua órbita é altamente excêntrica, só Plutão o supera nesse aspecto.

3.3.2.2 VÊNUS

Vênus é o nome latino da deusa grega do amor, Afrodite. Facilmente identificável no céu, esse planeta é também chamado de Estrela D'Alva ou estrela matutina - mas ele não é uma estrela! É o mais brilhante dos planetas e está sempre próximo ao Sol, como Mercúrio, pois suas órbitas são internas à da Terra. Enquanto Mercúrio é bastante pequeno (2/5 da Terra), Vênus já possui um tamanho comparável ao da Terra. Aliás, esse planeta é bastante parecido com o nosso, em massa e composição química. Apesar dessas similaridades, entretanto, sua atmosfera é bastante diferente da terrestre.

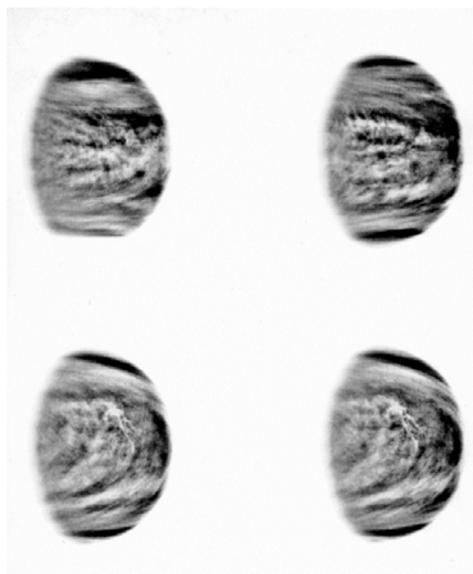


FIGURA 3.5- O PLANETA VÊNUS OBSERVADO PELA SONDA GALILEO (NSSDC).

A atmosfera de Vênus é bastante espessa e reflete a maior parte da luz solar incidente. Essa é a razão do seu grande brilho. Sua atmosfera também impede a observação direta da superfície do planeta. O raio de Vênus somente pode ser determinado com o uso de radares ou de sondas espaciais. Por ter um tamanho relativamente grande, seu manto é convectivo, pois não consegue dissipar o calor interno por condução, como acontece com Mercúrio (veja o quadro sobre as formas de transporte de energia). A convecção levou gases para a superfície, de modo a formar uma atmosfera composta basicamente por gás carbônico, CO_2 - quase 97 % - e gás nitrogênio, N_2 - 3 %. O gás carbônico é

responsável pela ocorrência do efeito estufa (veja quadro a seguir), que eleva a temperatura na superfície a 460°C. Note que essa temperatura chega a superar a de Mercúrio que está mais próximo do Sol e esperaríamos que fosse mais quente. As nuvens de Vênus são formadas por várias substâncias, entre elas o ácido sulfúrico. A pressão atmosférica de Vênus é bastante alta, cerca de 100 vezes maior que a da Terra. Existem também evidências de vulcanismo, que está relacionado ao manto convectivo. Por tudo isso, a superfície de Vênus possui condições bem inóspitas.

EFEITO ESTUFA

O Sol emite a maior parte de sua energia na forma de luz visível. Essa radiação ao atingir a superfície de um planeta é transformada em radiação infravermelha. O efeito estufa é produzido por certos gases na atmosfera, em especial o gás carbônico. A absorção da radiação por esses gases é maior na região infravermelha do que na região visível. Assim, mais radiação visível do Sol atravessa a atmosfera e alcança a superfície do planeta do que radiação infravermelha escapa para o espaço, o que faz com que parte da energia fique retida entre a atmosfera e a superfície do planeta. O resultado é que a atmosfera próxima à superfície fica aquecida. Esse efeito é similar ao que acontece nos carros. A luz visível entra pelo vidro e é transformada em radiação infravermelha, que o vidro não deixa escapar. Assim, o interior do carro aquece-se. É o que acontece com Vênus, e também com a Terra, por motivos naturais. Mas, nos últimos 150 anos a temperatura na Terra está crescendo, e isto pode ser devido ao aumento, causado pelo homem, da concentração dos gases responsáveis pelo efeito estufa.

Vênus possui rotação retrógrada, isto é, ele gira em sentido contrário ao da maior parte dos movimentos do sistema solar. É também o único planeta em que o tempo de rotação (243 dias) supera o de translação em torno do Sol (225 dias). Assim, o dia em Vênus dura mais que o ano!

3.3.2.3 A TERRA

Terra é o nome da deusa romana, esposa do Céu. Como já vimos, o planeta em que vivemos era considerado até o Renascimento como em posição privilegiada, em torno da qual o Universo existia. Com o avanço do nosso conhecimento, a Terra deixou de ocupar um lugar especial e passou a ser apenas mais um dos planetas de uma estrela comum, o Sol. Porém, ainda hoje é considerada particular, pela existência e complexidade da vida em sua superfície. A temperatura na Terra é tal que permite que a água exista no estado líquido*. Aliás, o nosso planeta deveria ser chamado de planeta Água e não Terra, pois 3/4 de sua superfície são cobertos pela água. Apenas para se ter uma idéia da quantidade de água dos oceanos, se a superfície do planeta se aplainasse, o planeta seria coberto por um oceano de 400m de profundidade. A água é um dos fatores essenciais que levou à existência da vida.

A atmosfera terrestre é formada basicamente por nitrogênio (78 %), que faz com que o nosso planeta seja azul quando visto de fora. Existem, porém, outros gases. Entre eles devemos salientar o oxigênio (20 %) e o ozônio, que bloqueiam a radiação ultravioleta do Sol, que é fatal para alguns microorganismos e prejudicial para os seres vivos em geral. O oxigênio da atmosfera terrestre é basicamente produzido pelas plantas, através da fotossíntese. Hoje, a atmosfera possui uma pequena quantidade de gás carbônico, porém ela já deve ter sido muito maior, mas foi consumida por vários processos. Assim, atualmente o efeito estufa é muito menor na Terra do que é em Vênus.

A Terra é um planeta bastante ativo geologicamente: possui vulcanismo e movimentos tectônicos importantes resultantes da convecção do manto interno à crosta.

O nosso planeta possui um satélite, a conhecida Lua. Sua superfície é coberta por crateras de impacto, principalmente na face oposta à Terra. Observa-se também os mares (regiões escuras) e montanhas (regiões claras). Os mares são grandes regiões preenchidas por lava solidificada. Porém, não há indícios de atividade vulcânica atual. Como não possui atmosfera significativa, sua temperatura é basicamente regida pela radiação solar, com grandes diferenças entre o dia e a noite.

---

* Além da Terra, é possível que Europa, um dos satélites Galileanos de Júpiter, possua água no estado líquido sob uma crosta de gelo.



FIGURA 3.6- MOSAICO DE IMAGENS DO PLANETA TERRA OBTIDAS COM A SONDA CLEMENTINE (NSSDC).

A Lua é um satélite relativamente particular dentro do sistema solar, pois possui um tamanho comparável ao da Terra. Sua massa é apenas 80 vezes menor que a da Terra. Ganímedes, por exemplo, é um dos satélites de Júpiter e sua massa é 10.000 vezes menor que a do planeta. O tamanho da Lua é apenas 1/4 do da Terra. Assim, do ponto de vista físico, o conjunto Terra-Lua poderia ser definido como um sistema binário.

Entre as possíveis teorias para explicar a formação lunar, existe a de formação conjunta com a Terra e posterior separação, captura, ou mesmo formação inicial em separado. A teoria mais aceita atualmente diz que a Terra sofreu o impacto de um objeto de massa muito alta (como Marte, por exemplo) e nesse processo uma parte da Terra foi ejetada e formou a Lua.



FIGURA 3.7 – IMAGEM DA LUA CHEIA OBTIDA PELA APOLLO 11 (NSSDC).

TABELA 3.4 - ALGUNS DADOS DA TERRA E DA LUA (FONTE: NSSDC).

Parâmetros	**Terra**	**Lua**
Massa	$5{,}9736\ 10^{24}$ kg	$0{,}0123\ \text{Massa}_{\text{Terra}}$
Raio equatorial	6378 km	$0{,}2724\ \text{Raio}_{\text{Terra}}$
Achatamento	0,0034	0
Semi-eixo maior da órbita	149,6 milhões de quilômetros	384.400 quilômetros
Período orbital	365,256 dias	27,322 dias
Inclinação da órbita	0 graus	5,1 graus
Excentricidade da órbita	0,0167	0,0549
Período de rotação	23,9345 horas	655,7 horas (27,32 dias)

3.3.2.4 MARTE

Marte é o planeta telúrico mais distante do Sol. Seu nome refere-se ao deus latino da guerra, cujo correspondente grego é Ares. Possui uma atmosfera tênue, cujo componente principal é o gás carbônico (95 %). Sua cor avermelhada é devida à poeira

que cobre parcialmente a sua superfície. Parte desta é recoberta por lava solidificada, formando grandes planícies. Mas existem também crateras de impacto e montanhas. A maior montanha do sistema solar está em Marte. É o monte Olimpo, um vulcão extinto, que possui 25 km da base ao topo! Devem ter ocorrido processos de convecção em algum momento do passado, mas como Marte é um planeta pequeno, esses processos cessaram e atualmente seu calor é dissipado por condução. A temperatura na superfície oscila entre -90 e 30 graus centígrados.

Marte possui dois satélites, Fobos e Deimos (em grego, Medo e Terror), cujos nomes representam os dois filhos do deus da guerra, Ares, na mitologia grega. São pequenos, da ordem de 10 quilômetros de raio, e possuem forma irregular, como a de uma batata. São provavelmente asteróides (veja a Seção 3.3.4), capturados pela gravidade do planeta.

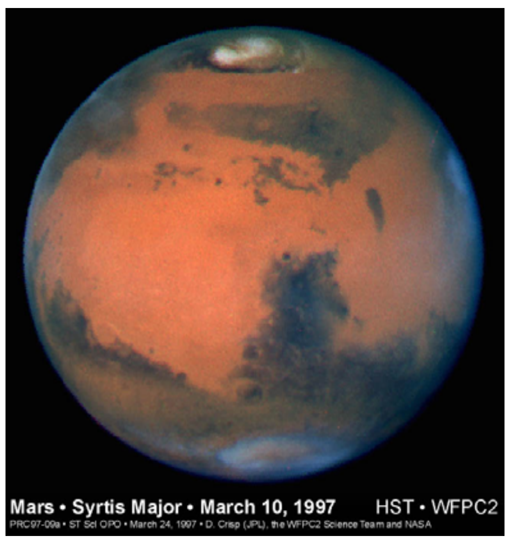


FIGURA 3.8 – IMAGEM DO PLANETA MARTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

3.3.2.5 JÚPITER

Júpiter é o maior planeta do sistema solar, sendo seu raio cerca de 11 vezes maior que o da Terra. É o protótipo dos planetas jovianos, os gigantes gasosos. Coincidentemente, o

seu nome latino corresponde em grego a Zeus, o maior dos deuses do Olimpo. Apesar de possuir, provavelmente, um núcleo formado por materiais pesados, ele é composto basicamente por hidrogênio e hélio na forma gasosa. Assim, Júpiter, como os demais planetas jovianos, não possui uma superfície sólida como os planetas terrestres.

Sua atmosfera é também formada por hidrogênio e hélio. Ela é bastante espessa e determina a aparência do planeta. A imagem de Júpiter mostra uma série de bandas coloridas paralelas ao seu equador, que correspondem a nuvens de diferentes movimentos, temperatura e composição química. Uma estrutura bastante interessante é a chamada *Grande Mancha Vermelha.* Como as bandas, ela também corresponde a um fenômeno meteorológico, por assim dizer. Ela é muito grande (10.000 x 25.000 quilômetros), muito maior que a Terra, por exemplo. É uma estrutura bastante estável, no sentido de que persiste há muito tempo.

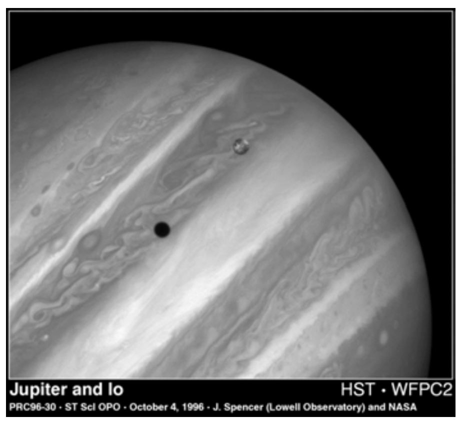


FIGURA 3.9 – IMAGEM DO PLANETA JÚPITER E SEU SATÉLITE IO OBTIDA PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Hoje conhecemos 28 satélites de Júpiter, mas esse número continua a crescer em virtude de novas descobertas. Entretanto, quatro deles destacam-se por seu tamanho: Io, Europa, Ganímedes e Calisto. São chamados satélites galileanos, pois foram descobertos por Galileu, no início do século XVII. Ganímedes é o maior satélite do sistema solar. Io e Europa são similares aos planetas telúricos, formados basicamente por rochas. Io possui vulcões ativos e Europa uma atmosfera de oxigênio, além de um possível oceano de água líquida sob uma crosta de gelo. De todos os satélites do sistema

solar, apenas 5 possuem atmosferas: Europa, Io, Ganímedes, Titã (Saturno) e Tritão (Netuno).

Além dos satélites, Júpiter possui um anel, como os demais planetas jovianos. Esse anel é bastante fino e escuro, diferente do de Saturno, que é bastante brilhante e define a aparência do planeta.

Júpiter emite mais energia do que recebe do Sol e este excesso deve ser de origem gravitacional.

3.3.2.6 SATURNO

O nome desse planeta vem do deus romano que ensinou aos homens a agricultura, e é por alguns associado ao deus grego Cronus. Saturno é o segundo maior planeta do sistema solar. É similar a Júpiter em vários aspectos, como na estrutura interna e atmosfera. Também possui bandas atmosféricas que, porém, são menos contrastantes entre si que as de Júpiter. Também, como Júpiter, possui uma pequena fonte de calor interna.



FIGURA 3.10 – IMAGEM DO PLANETA SATURNO OBTIDA PELA VOYAGER 2 (NASA).

Saturno possui um belo sistema de anéis que é visível através de uma pequena luneta. Dizemos um sistema, pois o disco que vemos em torno de Saturno corresponde a pelo menos sete anéis. Os anéis são compostos por partículas de gelo e poeira, cujos tamanhos vão desde um milésimo de milímetro até dezenas de metros. Apesar de sua grande extensão - o raio externo fica a 480 000 quilômetros do centro de Saturno -, os

anéis são extremamente finos, da ordem de duzentos metros. Para se ter uma idéia dessa proporção, imagine um disco do tamanho de um quarteirão com uma espessura de aproximadamente um centésimo de milímetro! Enquanto os anéis de Saturno são conhecidos há bastante tempo, os anéis dos demais planetas jovianos só foram descobertos na década de 70.

Saturno possui ao menos 30 satélites. Um satélite bastante peculiar é Titã. É o segundo maior satélite do sistema solar. Possui um núcleo rochoso, recoberto por um manto de gelo de compostos orgânicos. Sua espessa atmosfera é formada principalmente por nitrogênio e contém também moléculas orgânicas complexas, estrutura que se supõe ser similar à atmosfera terrestre primitiva. A temperatura máxima na superfície de Titã é de -100 graus centígrados.

3.3.2.7 URANO

Até agora falamos apenas de planetas conhecidos desde a Antigüidade. Urano foi o primeiro dos planetas a serem descobertos na era moderna, em 1781, pelo astrônomo inglês de origem alemã William Herschel (1738-1822). Urano, cujo nome refere-se ao deus grego que personifica o céu, deve possuir um núcleo rochoso similar ao da Terra recoberto por um manto de gelo. Assim, ele é diferente de Júpiter e Saturno na estrutura interna. Sua atmosfera é composta basicamente por hidrogênio e hélio, mas contém também um pouco de metano. Possui também bandas atmosféricas, como os demais planetas jovianos.

Urano possui uma anomalia no que tange ao seu eixo de rotação, que está muito próximo do plano orbital, isto é, o seu eixo é praticamente perpendicular ao dos demais planetas. Supõe-se que isso se deva ao efeito de um grande impacto. Como ele possui um sistema de anéis como, estes são observados de frente e não lateralmente como os de Saturno, por exemplo.

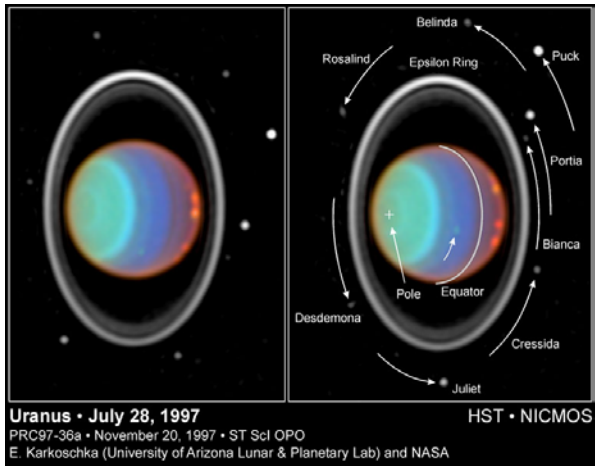


FIGURA 3.11 - O PLANETA URANO COM SEU DISCO E SATÉLITES. IMAGEM OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Esse planeta possui 21 satélites conhecidos, todos compostos principalmente por gelo. Dentre suas maiores luas, a mais próxima de Urano é Miranda. Ela possui um relevo bastante particular, formado por vales e despenhadeiros.

3.3.2.8 NETUNO

Logo após a descoberta de Urano, foi notado que os cálculos matemáticos não reproduziam com exatidão a sua órbita. Foi então sugerido que existiria um outro planeta, cuja influência gravitacional era a responsável pelos desvios de sua órbita. Em 1845, o jovem matemático inglês John C. Adams (1819-1892) e pouco depois o astrônomo francês Urbain Le Verrier (1811-1877) previram a existência de Netuno, que foi, então, observado pelo astrônomo alemão Johann G. Galle (1812-1910) e H. L. d' Arrest em 1846. O fato de que Netuno não foi descoberto, mas sim previsto, é considerada uma grande vitória da ciência.

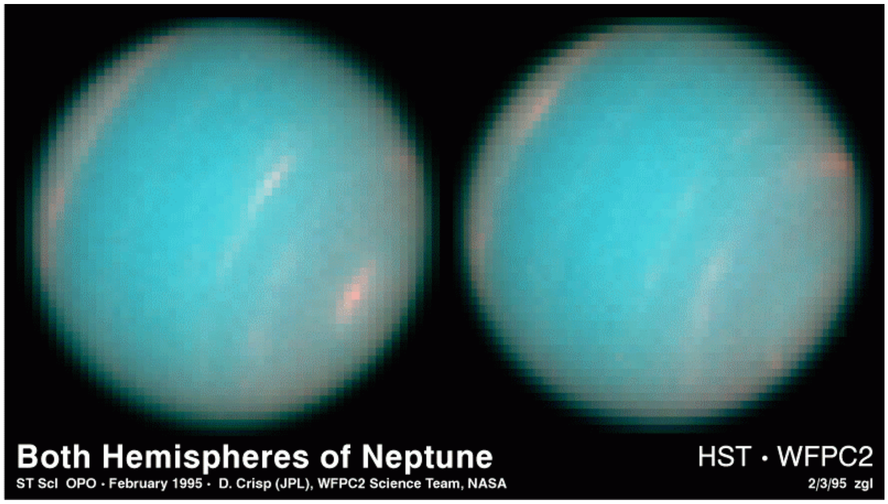


FIGURA 3.12 – IMAGENS DOS DOIS HEMISFÉRIOS DO PLANETA NETUNO OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Netuno é o nome latino de Possêidon, o deus grego dos mares. Possui uma estrutura interna muito similar a Urano, sendo formado por rochas e gelo. Apresenta uma atmosfera espessa com bandas atmosféricas. Possui oito satélites e um sistema de anéis. Dentre seus satélites, destaca-se Tritão. É um satélite ativo possuindo os chamados vulcões de gelo. Dentre todos os corpos do sistema solar, a atividade vulcânica só está presente na Terra, Vênus, Io e Tritão.

3.3.2.9 PLUTÃO

Plutão - o último dos planetas do sistema solar - foi descoberto em 1930, pelo americano Clyde Tonbaugh. Plutão, na mitologia, é o deus romano do mundo dos mortos, mundo este chamado de Hades pelos gregos. Sua órbita é tão excêntrica, que sua distância ao Sol pode variar em 40%. Devido a isso, sua órbita e a de Netuno se interceptam, de modo que em algumas situações Netuno passa a ser o planeta mais afastado do Sol. Plutão é o menor dos planetas, sendo menor até que a nossa Lua. Sua distância e tamanho tornam bastante difícil sua observação, assim algumas das informações que temos sobre esse planeta são ainda incertas. Deve ser composto de rochas (70 %) e gelo de compostos orgânicos (30 %). Parece apresentar uma pequena atmosfera de Nitrogênio, monóxido de carbono e metano (CH_4).



FIGURA 3.13 – IMAGEM DO PLANETA PLUTÃO E SEU SATÉLITE CARONTE OBTIDA COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Plutão possui um satélite, Caronte - nome do barqueiro, que na mitologia grega, atravessa o rio levando as almas para o Hades. Descoberto apenas em 1978, é um pequeno satélite, de composição e tamanho comparáveis ao de Plutão: o raio de Caronte é aproximadamente metade o de Plutão. Assim, pode-se considerar que ambos formam um sistema duplo de planetas.

3.3.2.10 EXISTEM OUTROS PLANETAS NO SISTEMA SOLAR?

Recentemente descobriram-se muitos asteróides com órbitas similares a de Plutão. Esses objetos são chamados de transnetunianos. Eles são parecidos com Plutão, mas são menores – até o momento não foi encontrado nenhum maior que Plutão. A região onde se concentram esses objetos é chamada de Cinturão de Kuiper e se situa cerca de 50 vezes mais distante do Sol que a Terra. Por vezes a descoberta de um novo objeto desse tipo é alardeada como a descoberta de um novo planeta, o que não é correto: eles são asteróides ou cometas. Por outro lado, alguns pesquisadores argumentam que Plutão não é corretamente classificado como um planeta, mas sim como o maior dos objetos transnetunianos. Entretanto, a União Astronômica Internacional – o mais alto órgão da astronomia mundial - ainda classifica Plutão como planeta.

3.3.3 ASTERÓIDES

Apesar do nome de origem grega que significa "similar a estrelas", os asteróides são mais parecidos aos planetas, apesar de muito menores. Concentram-se, em sua maioria,

em um anel entre as órbitas de Marte e Júpiter. Imagine o que aconteceria se um planeta fosse quebrado em milhares de pedacinhos e esses pedacinhos fossem espalhados ao longo de sua órbita. Um cinturão de asteróides é aproximadamente isso. Porém, os asteróides não devem ser o resultado de um processo destrutivo, mas, sim, um planeta que não deu certo. Como veremos mais adiante os planetas devem ter sido formados aos poucos, a partir da aglutinação de pedaços menores.

O diâmetro dos asteróides pode chegar a centenas de quilômetros. O maior deles, Ceres, tem um diâmetro de 974 quilômetros. Os grandes asteróides são esféricos, mas os menores podem possuir formas irregulares (como a de batatas). A maior parte deles são formados basicamente por rochas (silicatos). Porém, alguns podem ser metálicos (ferro).

3.3.4 COMETAS

O sistema solar não abrange apenas o Sol, os planetas, seus satélites e asteróides. Os cometas pertencem também ao sistema solar e, como os planetas, orbitam em torno do Sol. Porém, suas órbitas não se restringem ao plano do sistema solar, que contém as órbitas dos planetas. As órbitas dos cometas possuem inclinações as mais variadas, com excentricidades bastante altas e raios muito grandes, maiores que os dos planetas mais distantes. Quanto à sua composição, o núcleo de um cometa é um aglomerado de matéria sólida: grãos de poeira e gelo de materiais orgânicos. Quando um deles se aproxima do Sol, o material de sua superfície sublima, formando uma nuvem de gás e poeira ao seu redor. Essa é a chamada coma. O movimento do cometa, em combinação com a ação do vento solar, forma duas caudas: a de gás e a de poeira.

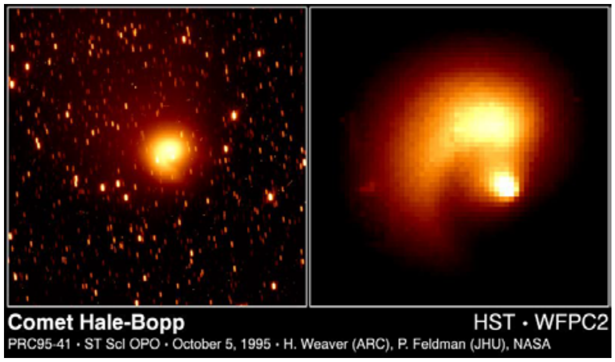


FIGURA 3.14 – IMAGENS DO COMETA HALE-BOPP OBTIDAS COM O HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

Hoje se acredita que os cometas são resquícios da época da formação do sistema solar. Sua composição deve ser a mesma da nuvem primordial que deu origem ao Sol e aos planetas (veja a Seção 3.5). Mas, de onde vêm os cometas? Provavelmente de uma região bastante afastada do sistema solar chamada Nuvem de Oort, idealizada pelo holandês Jan H. Oort. Supõe-se que ela seja uma nuvem de gás, poeira e cometas que circunda todo o sistema solar, formando uma casca esférica. Os cometas concentram-se nessa região e, ocasionalmente, são perturbados e suas órbitas modificam-se de modo a passar próximo ao Sol: nessa situação eles tornam-se visíveis.

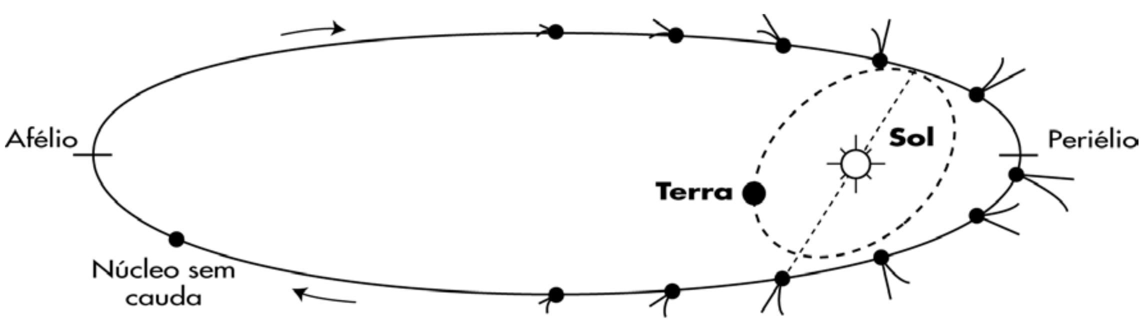


FIGURA 3.15 - UM EXEMPLO DE ÓRBITA DE COMETA.

3.3.5 METEOROS. METEORITOS E METEORÓIDES

Qual a diferença entre meteoro, meteoróide e meteorito? Um meteorito é um objeto sólido que atingiu a superfície terrestre. O meteoro é o fenômeno que ocorre quando um corpo entra na atmosfera terrestre e deixa um rastro luminoso provocado pelo atrito - são as chamadas estrelas cadentes. O corpo que entra na atmosfera é o meteoróide.

Os meteoróides são fragmentos de cometas ou asteróides. Os menores são desintegrados pelo atrito com a atmosfera e apenas os maiores podem chegar à superfície da Terra. Esses meteoritos são, em sua maior parte, originários de asteróides.

Os cometas deixam atrás de si rastros de poeira que formam tubos com diâmetros da ordem de 10 a 50 milhões de km!! Se a Terra atravessa um desses anéis de poeira, ocorre a chamada chuva de meteoros. É por isso que existem determinadas épocas do ano para que isso ocorra: é quando a Terra atravessa o rastro de um cometa importante.



FIGURA 3.16 – METEORITO DE UM FRAGMENTO DO ASTERÓIDE VESTA (NASA).

Hoje a teoria mais aceita para a extinção dos dinossauros é a de um impacto de um meteorito ocorrido no México, próximo à Península de Yucatan, por volta de 65 milhões de anos atrás. Segundo pesquisas recentes, esse meteorito teria um diâmetro de cerca de 10 km. A cratera formada teria entre 200 a 250 quilômetros de diâmetro, e é denominada Cratera de Chicxulub. O choque teria levantado uma enorme quantidade de poeira, que teria bloqueado os raios solares e levado ao resfriamento drástico da superfície terrestre por vários meses. Isso teria provocado a morte das plantas e dos

animais que delas se alimentavam. A energia estimada para esse impacto corresponde a cinco bilhões de bombas nucleares como a que foi lançada em Hiroshima.

3.4 OS MOVIMENTOS NO SISTEMA SOLAR

Como vimos logo no início deste capítulo, os corpos do sistema solar destacaram-se entre as estrelas fixas devido aos seus movimentos. A *cinemática* é a área da Física que descreve os movimentos sem se preocupar com o que os causa. No caso do sistema solar, os movimentos dos planetas foram descritos por Kepler através de três leis que enumeramos abaixo. Mais tarde, Newton explicou esses movimentos considerando as forças que agem sobre os corpos: a área da Física que estuda as forças que determinam o movimento de um corpo é chamada *dinâmica*. A força em questão é a gravitacional.

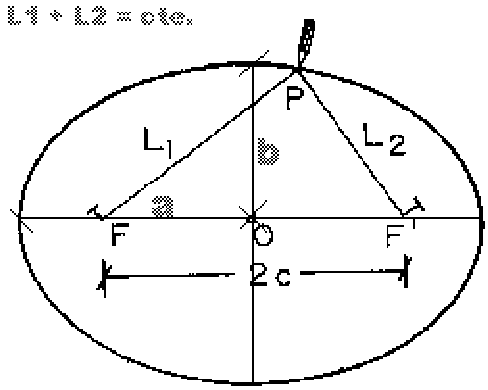
3.4.1 AS LEIS DE KEPLER

No início do século XVII, Kepler derivou três leis empíricas que descrevem o movimento dos planetas. As duas primeiras foram determinadas simultaneamente (1609) e são o resultado de sua tentativa de descrever corretamente os movimentos planetários. A terceira lei, determinada dez anos mais tarde (1619), relaciona os períodos e tamanhos das órbitas e, de certa forma, traduz uma certa harmonia entre os movimentos dos corpos, o que talvez fosse o principal objetivo de Kepler.

- <u>Primeira Lei – Lei das órbitas elípticas</u>: A órbita de um planeta é uma elipse (veja quadro adiante) com o Sol em um dos focos. Assim, as distâncias entre um planeta e o Sol são variáveis ao longo da translação do planeta.

DEFININDO UMA ELIPSE

Uma elipse é o conjunto de pontos cuja soma das distâncias, L_1 e L_2, a dois pontos fixos, F e F', chamados focos, é uma constante.



A excentricidade, e, de uma elipse é definida como:

$$e = \frac{c}{a}.$$

A circunferência é uma elipse de excentricidade zero. Assim, F = F' = centro da circunferência. Nesse caso, também, $L_1 = L_2$ = Raio da circunferência.

- <u>Segunda Lei - Lei das áreas:</u> Ao longo de sua órbita, um planeta possui uma velocidade variável, de modo que a área coberta pela linha que liga o Sol ao planeta é sempre a mesma em intervalos de tempo iguais (Fig. 4.17).

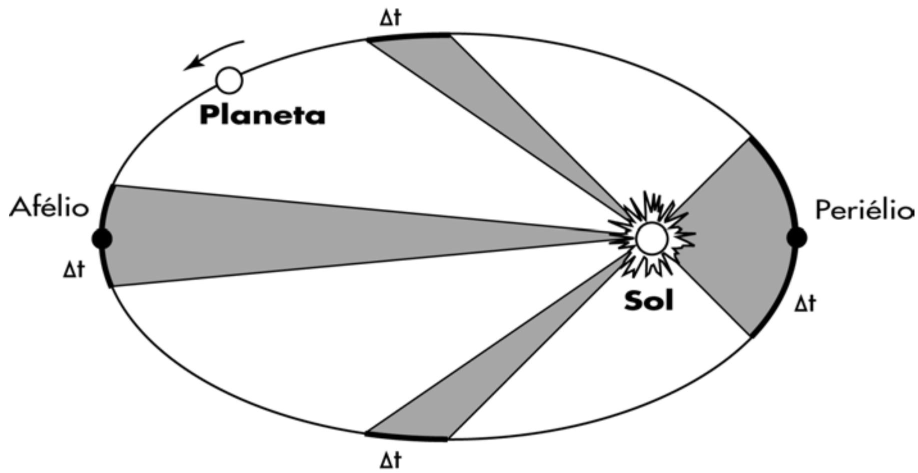


FIGURA 3.17 - LEI DAS ÁREAS.

- <u>Terceira Lei – Lei Harmônica</u>: A razão entre o quadrado do período de translação, P, de um planeta e o cubo do semi-eixo maior de sua órbita, a, é a mesma para todos os planetas:

$$\frac{a^3}{P^2} = K$$

3.4.2 A LEI DE TITIUS-BÖDE

No século XVIII, dois astrônomos alemães, Titius e Johann Bode (1747-1826), descobriram que as distâncias, D, dos planetas ao Sol podem ser descritas por uma lei com a forma abaixo:

$$D_n = 0.4 + 0.3 * 2^n,$$

Onde a distância D é dada em relação à distância Sol-Terra e n possui os valores de -∞ para Mercúrio, 0 para Vênus, 1 para a Terra, 2 para Marte e assim sucessivamente. O número 3 corresponde ao cinturão de asteróides entre as órbitas de Marte e Júpiter. Na época da publicação dessa lei, ainda não se conheciam os planetas não visíveis a olho nu. A Tabela 3.5 mostra uma comparação entre a Lei de Titius-Böde e os valores atuais.

TABELA 3.5 – LEI DE TITIUS-BÖDE

Planeta	**n**	**Lei de Titius-Böde**	**Observado**
Mercúrio	1	0,4	0,387
Vênus	2	0,7	0,723
Terra	3	1,0	1,000
Marte	4	1,6	1,524
Asteróides	5	2,8	
Júpiter	6	5,2	5,204
Saturno	7	10,0	9.582
Urano	8	19,6	19,201
Netuno	9	38,8	30,047
Plutão	10	77,2	39,24

Ainda não existe uma explicação para essa relação. Assim, não se sabe se é uma simples coincidência matemática ou se está realmente ligada ao processo de formação/estabilidade do sistema solar.

3.5 A FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

O Universo conhecido é basicamente vazio. A matéria concentra-se em pequenas regiões. Isto é, o Universo possui uma certa estrutura. Exatamente como o homem não ocupa uniformemente toda a superfície terrestre, a matéria não se distribui igualmente no Universo. A matéria tende a se concentrar nas galáxias, como o homem tende a se concentrar nas cidades - entenda o que são galáxias no Capítulo 6.

A galáxia em que vivemos chama-se Via Láctea. As estrelas que formam a Via Láctea formam a faixa esbranquiçada, de aparência leitosa, que pode ser vista em noites escuras de inverno. O Sol é apenas uma das bilhões de estrelas que existem na Via Láctea. O planeta mais distante encontra-se muito mais perto que a estrela mais próxima. Plutão encontra-se a 4 horas-luz, enquanto que a estrela mais próxima está a mais de 4 anos-luz.

Em galáxias do tipo da nossa Via Láctea, que é uma galáxia espiral (veja o que é uma galáxia e como são no Capítulo 6), existem nuvens de matéria na região equatorial. Essas nuvens não são como as da nossa atmosfera, que são basicamente compostas por água, mas aglomerados de gás e poeira. As estrelas, de modo geral, e o nosso sistema solar, em particular, tiveram sua origem em uma nuvem desse tipo. Isto é, o Sol nasceu e foi formado em uma dessas nuvens.

A composição química dessa nuvem é basicamente a mesma do Sol e do Universo, preponderantemente hidrogênio. Os elementos mais pesados existem em uma quantidade muito menor. A tendência é que os elementos mais pesados sejam menos abundantes que os elementos mais leves nos corpos celestes - exceção feita a alguns corpos celestes, entre eles a Terra.

O modelo mais aceito atualmente para a formação do sistema solar considera que o sistema solar como um todo (Sol, planetas, etc.) surgiu a partir de uma mesma nuvem de gás e poeira: a Nebulosa Solar Primitiva. Em algum momento, essa nuvem começou a se contrair devido à autogravidade. O estopim de um processo desse tipo pode ter sido a explosão de uma estrela chamada supernova (leia sobre supernovas no Capítulo 5 sobre estrelas). Essa explosão fez com que o equilíbrio gravitacional da nuvem acabasse, e assim começasse a sua contração. Poderíamos dizer que assim foi a concepção do sistema solar. O colapso gravitacional pode ter ocorrido naturalmente, também.

Assim, o sistema solar em seu início, há cerca de 4,6 bilhões de anos atrás, era muito diferente do que é hoje. Ele evoluiu, exatamente como os seres vivos evoluem ao longo de sua vida, porém, de maneira completamente diversa.

Inicialmente, o Sol não era uma estrela exatamente como é hoje, com fusão de energia em seu interior. Os planetas também não existiam. Existia apenas uma concentração de

massa central e um disco de matéria em torno dela. Enquanto a concentração de massa central evoluía para o que é o nosso Sol atualmente, o disco estruturava em anéis. Eles iriam transformar-se nos planetas. Um dos anéis não deu origem a um planeta, mas continua até hoje como um anel. É o chamado cinturão de asteróides, entre as órbitas de Marte e Júpiter.

Como um anel de matéria em torno do Sol transforma-se em planeta? O gás e poeira presente nesses anéis colidem e formam pequenos aglomerados de matéria, chamados planetesimais. Esses planetesimais, por sua vez, também podem colidir e na colisão pode ocorrer liberação de calor. Esse calor pode ser usado para derreter os planetesimais e assim "grudá-los".

Do colapso inicial da nuvem até o início da condensação dos planetas o intervalo de tempo deve ser da ordem de 10 milhões de anos. Até que o Sol se torne uma estrela transcorrem-se 50 milhões de anos. Para chegar ao estágio final de um sistema planetário deve transcorrer 1 bilhão de anos. O sistema solar deve ter cerca de 5 bilhões de anos de idade.

Toda a teoria exposta acima está de acordo com as características gerais do sistema solar. Alguma delas são: (1) os planetas se encontram aproximadamente em um mesmo plano que é o plano equatorial do Sol; (2) as órbitas são quase circulares; (3) grande parte das rotações é prógrada.

A teoria de formação do sistema solar também nos fornece uma explicação para a existência de dois grupos de planetas. Os planetas formaram-se a partir da aglutinação de corpos menores. Nessa época, as temperaturas nas regiões próximas ao Sol, onde se formaram os planetas interiores, eram altas o suficiente para que os elementos mais leves não pudessem estar na forma sólida, e assim não poderiam se aglutinar para formar corpos cada vez maiores. Isto é, apenas materiais pesados poderiam permanecer sólidos e formar os planetesimais. Já para distâncias maiores, mesmo os elementos leves poderiam estar sob forma sólida e, por serem mais abundantes, os planetas gigantes são formados basicamente por esses elementos.

É interessante notar que muito do que sabemos sobre a formação do sistema solar é corroborado pelo que observamos no Universo. Existem regiões onde ocorre

atualmente a formação de estrelas, exatamente como aconteceu em nosso sistema solar. Faça uma analogia com os seres humanos. Em uma festa, um dos convivas é um jovem de 20 anos. Porém entre todos os convidados você pode encontrar bebês, crianças, adolescentes, adultos e idosos, todos ao mesmo tempo. Isto é, você pode encontrar pessoas mais jovens e mais velhas que aquele jovem de 20 anos.

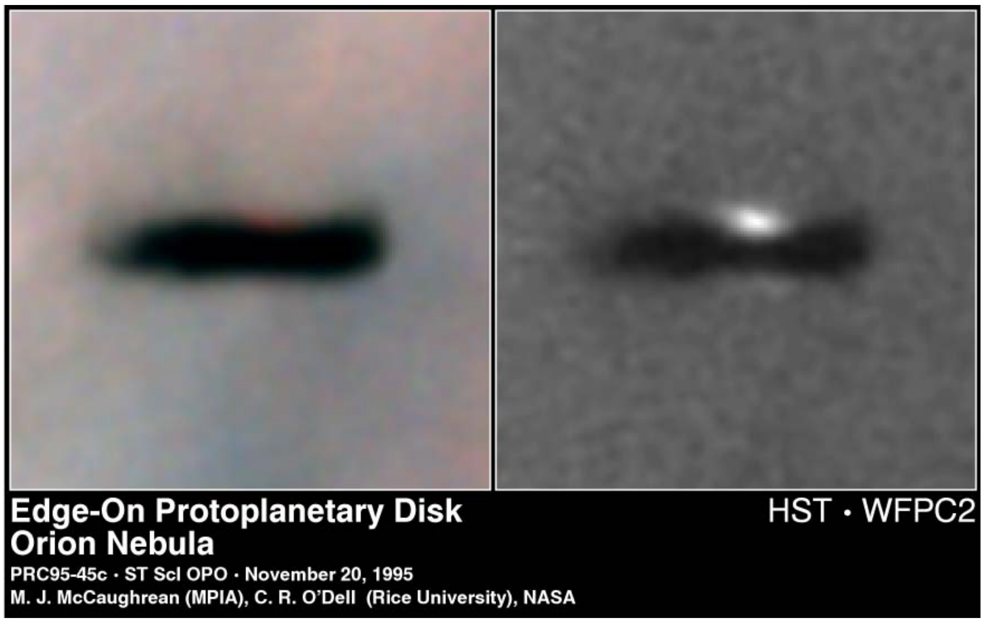


FIGURA 3.18 - UM DISCO PLANETÁRIO OBSERVADO NA REGIÃO DE ÓRION PELO HUBBLE SPACE TELESCOPE (STSCI).

3.6 EXISTEM OUTROS SISTEMAS PLANETÁRIOS NO UNIVERSO?

Existe vida fora do planeta Terra? Dentro do sistema solar existe a possibilidade de sondas colherem material de outros planetas ou satélites, que pode ser analisado com a intenção de descobrir indícios de vida. Por outro lado, os meteoritos podem trazer material extraterrestre que em muitos casos é conservado sem alteração e também se constitui em amostras para a investigação de traços de vida.

Mas, como podemos investigar a existência de vida fora do sistema solar? A resposta passa necessariamente pela detecção de outros sistemas planetários. Os tamanhos dos planetas são tipicamente muito menores que os das estrelas e mais do que isso, eles são muito menos luminosos. Por serem pouco brilhantes, pequenos e próximos da estrela, a sua detecção direta é longe de ser trivial. Existe, porém, algumas maneiras indiretas. Já vimos que, em um sistema binário, os corpos giram em torno do centro de massa do sistema. Assim, caso exista um planeta de massa considerável, poderíamos observar um pequeno movimento de translação da estrela. Esse movimento pode ser detectado através da análise das linhas espectrais de uma estrela ou da variação do intervalo entre pulsos de emissão, no caso de pulsares. Essa técnica já permitiu a detecção de alguns planetas fora do sistema solar. A geometria da nuvem de poeira em volta de algumas estrelas jovens, também sugere, de modo ainda mais indireto, a possível existência de planetas.▪

▪ Consultem a seção de divulgação da página das Divisão de Astrofísica (http://www.das.inpe.br) para links, notícias, e outras informações.

3.7 BIBLIOGRAFIA

Guizzo, J. **O Universo**. 4.ed. São Paulo: Ática, 1996. (Série Atlas Visuais)

Beatty, J. K.; O'Leary, B.; Chaikin, A. **The new solar system**. Cambridge Univ. Press, 1991.

Encrenaz, T.; Bibring, J.-P.; Blanc, M. **The solar system**. New York: Springer-Verlag, 1991.

Jatenco-Pereira, V e outros. **Astronomia: Uma visão geral do Universo**. São Paulo: EDUSP, 2000.

Maciel, W. J. ed. **Astronomia e Astrofísica**: texto do curso de extensão universitária do Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico, USP. São Paulo, 1991.

Nussenzveig, H. M. **Curso de Física básica: 1 – Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

Oliveira Filho, K. S; Saraiva, M. F. O. **Fundamentos de astronomia e astrofísica**. Porto Alegre: Depto. de Astronomia do Instituto de Física –UFRGS, 1999.

Capítulo 4

O SOL

José Roberto Cecatto*

* e-mail: jrc@das.inpe.br

O SOL

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

4.1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista dos seres humanos a Terra e o Sol, não necessariamente nesta ordem, são os astros mais importantes do sistema solar. O primeiro por se tratar de nossa "casa", e o segundo por ser aquele que mantém a Terra um planeta bastante agradável e propício para a existência da vida em suas diversas formas que conhecemos. Além disso, aprendemos a conhecer o Sol desde a infância como fonte de luz e calor intensos que nos permite as primeiras percepções visuais a respeito do mundo que nos cerca. Com o passar dos anos aprendemos a tirar proveito de sua luz e calor e a admirar sua imponência no céu diurno, como fazemos com a Lua no céu noturno. Além disso, desde os primórdios da civilização o homem aprendeu a admirar o Sol como o responsável pela existência e manutenção da vida na Terra e por isso mesmo, na maioria das culturas antigas, o Sol era adorado como um Deus. O Sol já foi chamado de Helios pelos gregos, de Mitras pelos persas e de Rá pelos egípcios.

Entretanto, a despeito de aceitarmos a presença do Sol no céu não deixamos de nos perguntar de onde vem toda sua energia - luz e calor - que somos capazes de ver e sentir, e que o caracteriza como uma estrela que é a mais próxima da Terra. Por estar relativamente próximo da Terra, há milhares de anos o homem na Terra já identificava as principais características do Sol, como por exemplo, as manchas solares escuras e as regiões mais brilhantes na superfície, além da rotação do disco solar. Mais recentemente, com o advento de técnicas poderosas e avançadas, temos nos aproximado de desvendar alguns de seus mistérios.

O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra. Esta distância eqüivale a cerca de 8 minutos-luz. A Tabela 4.1 mostra um resumo das principais características do Sol.

O Sol encontra-se no centro geométrico e gravitacional do sistema solar. Em torno dele orbitam todos os outros corpos, como planetas, asteróides e cometas.

Tabela 4.1 - Características do Sol.

Massa	$1{,}989 \times 10^{30}$ kg
Raio Equatorial	695.000 km
Raio Médio	109,2 raios terrestres
Densidade Média	1,41 g/cm^3
Densidade Central	162 g/cm^3
Período de Rotação Equatorial*	609 horas (~25 dias)
Velocidade de Escape	618,02 km/s
Distância Média à Terra	149,6 milhões de km
Luminosidade	$3{,}83 \times 10^{33}$ ergs/s
Temperatura Média na Superfície	5.500^o C

- O Sol apresenta rotação diferencial, isto é, o período de rotação depende da latitude. Nas regiões polares, a rotação dura cerca de 30 dias.

4.2 A ESTRUTURA DO SOL

O Sol pode ser dividido em interio solar e atmosfera solar. O interior é composto de Núcleo, Zona radiativa e Zona convectiva. A parte mais externa do Sol, referida de atmosfera solar é composta de 3 camadas: a fotosfera, a cromosfera e a coroa.

4.2.1 O INTERIOR E A ENERGIA SOLAR

Nem todas as estrelas têm a mesma estrutura interna. Esta depende da massa da estrela. Para o Sol, a estrutura interna é composta de um núcleo, zona radiativa e um envelope convectivo que pode chegar até a superfície. A Figura 4.1, mostra um esquema das camadas do interior solar.

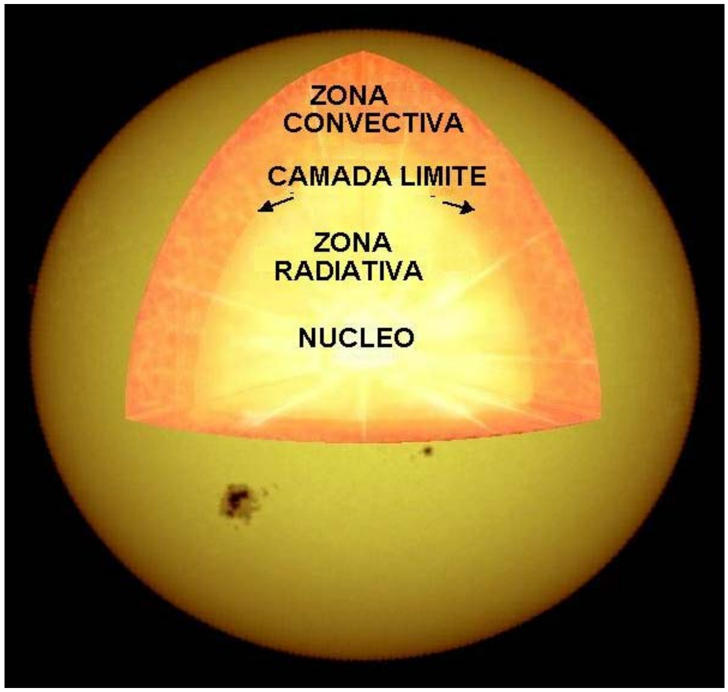


FIGURA 4.1 - ESQUEMA REPRESENTANDO AS CAMADAS INTERNAS DO SOL: NÚCLEO, ZONA RADIATIVA E ZONA CONVECTIVA. O NÚCLEO DO SOL ENCONTRA-SE EM EQUILÍBRIO RADIATIVO COBERTO POR UMA CAMADA ONDE OCORRE CONVECÇÃO (FONTE: HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL)

O Sol emite uma potência de 3,9 x 10^{26} W. Toda essa energia se origina de reações nucleares que ocorrem no seu centro interior e demora 10^{7} anos para ser transportada pela zona radiativa e em seguida pela zona convectiva acima desta até atingir a superfície, onde a temperatura é aproximadamente 5.800 K.

O estudo científico das condições físicas no interior e na atmosfera das estrelas nos permitiram determinar seus processos de produção de energia. Sabemos que as estrelas são gigantescas massas de gás (predominantemente hidrogênio) que se mantém coesas pela própria força gravitacional. Por este motivo, tanto a pressão quanto a temperatura do gás são altíssimas no núcleo das estrelas. Por exemplo, a temperatura é da ordem de dezenas a centenas de milhões de graus (cerca de 15 milhões de graus no caso do Sol). A estas temperaturas e pressões o gás encontra-se no estado ionizado - plasma - estabelecendo um ambiente propício para a ocorrência de reações nucleares de fusão dos elementos mais leves (hidrogênio - e seus isótopos, deutério e trítio - e hélio). Devido a alta pressão no centro, o gás apresenta propriedades que podem ser melhor

descritas no estado de fluido ao invés do estado gasoso. Da energia produzida pela fusão dos elementos no núcleo das estrelas - em especial, o Sol - parte é usada para manter as condições de temperatura e pressão interna e parte é emitida na forma de radiação que escapa pela superfície iluminando e aquecendo os astros do espaço interplanetário.

Observando-se a superfície solar com grande aumento pode-se ver grãos semelhantes a bolhas de água em ebulição dentro de uma panela (Figura 4.2). No caso do Sol, são bolhas de gás muito quente transportando a energia do interior para a superfície. No envoltório abaixo da superfície, a energia é transportada por convecção do gás. A convecção ocorre devido a grande opacidade dessa camada à transferência de energia pelo processo radiativo. Assim, as porções mais internas do gás, aquecidas pela radiação que vem do núcleo, expandem-se e sobem até a superfície, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriarem tornam-se mais densas e pesadas, tornando a descer. As células de convecção têm cerca de 5.000 km e se movimentam em escalas de 10 minutos.

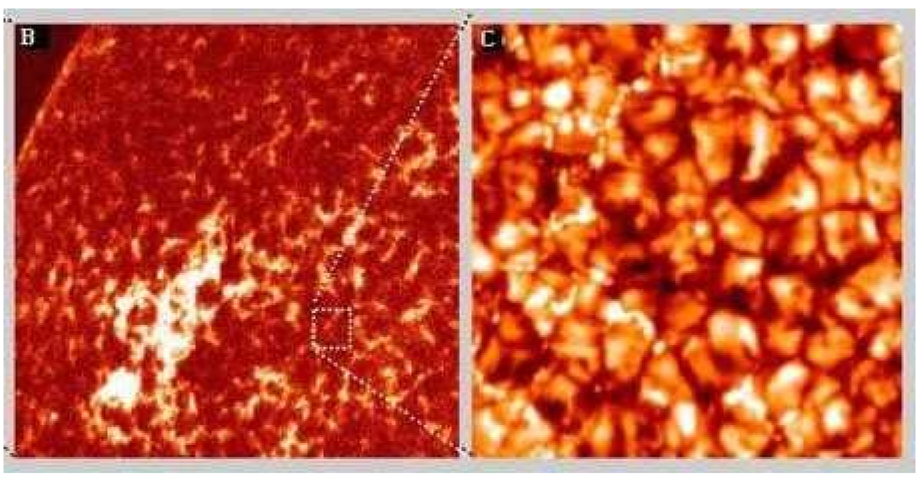


FIGURA 4.2 - IMAGENS MOSTRANDO O FENÔMENO DE GRANULAÇÃO DA FOTOSFERA SOLAR. (FONTE: HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML)

4.2.2 A ATMOSFERA SOLAR

A atmosfera solar é composta basicamente por 3 camadas: fotosfera - visível a olho nu, cromosfera acima da primeira, e coroa solar, a camada mais externa e tênue.

4.2.2.1 FOTOSFERA

Trata-se da camada visível do Sol. É uma estreita camada de cerca de 500 km de espessura, o que equivale a cerca de meio milésimo do raio solar. É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto. A densidade é de cerca de 10^{13}-10^{15} partículas por centímetro cúbico. Além da granulação, nesta camada, podem ser observadas manchas escuras que surgem e praticamente desaparecem por completo em períodos regulares de cerca de 11 anos. A Figura 4.3 mostra exemplos de grupos de manchas solares observadas sobre o disco solar.

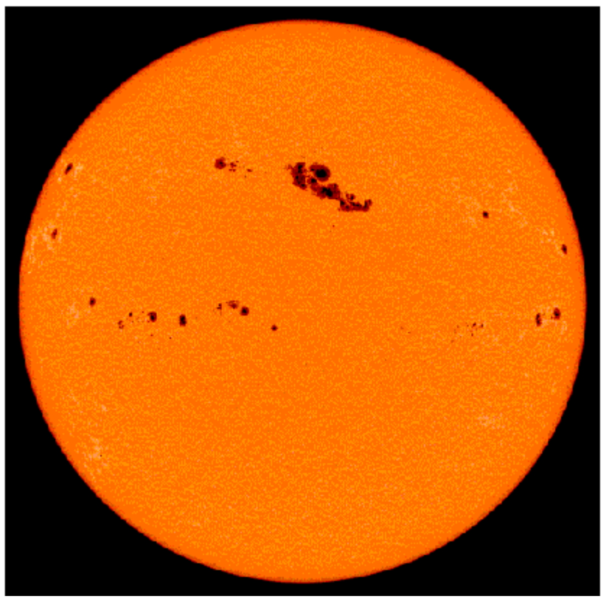


FIGURA 4.3 - DISCO SOLAR COM MANCHAS SOLARES. (FONTE: HTTP://WWW.SPACEWEATHER.COM)

Essas manchas já eram observadas pelos chineses milhares de anos antes de Cristo e ficaram conhecidas como manchas solares. Entretanto, o estudo mais sistemático e científico das manchas solares só começou com o uso do telescópio, sendo observadas (por projeção da imagem do Sol) desde Galileo, já em 1610. Como ficará claro mais tarde, estão relacionadas com o ciclo de atividade solar.

As manchas solares tendem a se formar em grupos (Figura 4.4) e são constituídas de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperaturas em torno de 3.800 K,

e a penumbra, região um pouco mais clara e com estrutura radial em torno da umbra. A Figura 4.5 mostra manchas solares onde pode-se identificar a umbra e a penumbra.

A presença de manchas solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar. Uma vez que o campo magnético inibe o processo convectivo, o transporte de energia nas manchas é bem menor, e consequentemente as manchas são significativamente mais frias emitindo bem menos radiação que o restante da superfície solar. Por este motivo, devido ao contraste com a superfície solar mais brilhante é que as manchas aparecem escuras. Normalmente, as manchas aparecem na superfície solar em grupos que evoluem em número e área total e podem durar até 2 rotações solares.

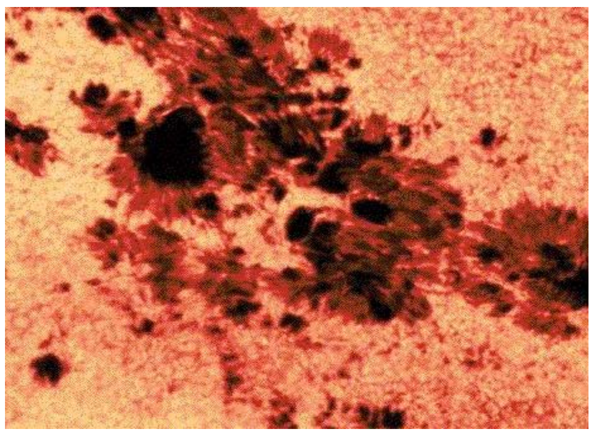


FIGURA 4.4 - EXEMPLO DE GRUPO DE MANCHAS SOLARES. (FONTE: HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL)

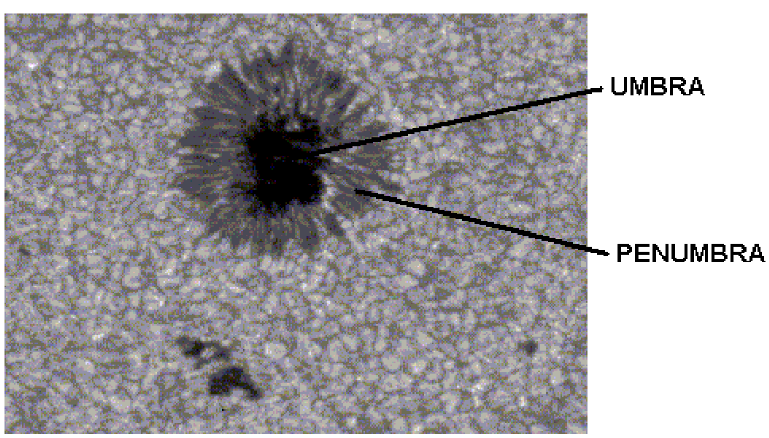


FIGURA 4.5 - IMAGEM DE UMA MANCHA SOLAR. PODEM SER IDENTIFICADAS A UMBRA E A PENUMBRA. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

O número de manchas presentes no disco solar está diretamente relacionado ao nível de atividade do ciclo que é explicado adiante. Observando-se um determinado grupo de manchas ao longo de vários dias constata-se que o Sol possui rotação com um período médio de 27 dias (possui rotação diferenciada de 25 dias no Equador e 30 dias nas proximidades dos pólos). O escurecimento - opacidade - observado do limbo é uma informação de que a temperatura cai com a altura na fotosfera (Figura 4.6) Esta camada apresenta uma temperatura que vai de ~ 5.800 K na superfície solar até cerca de 4.200 K na sua parte mais elevada, próximo à base da cromosfera.

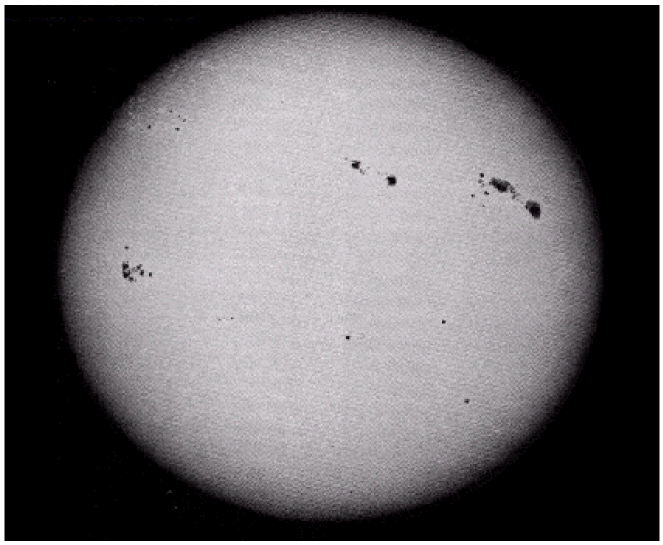


FIGURA 4.6 - IMAGEM DO SOL EM LUZ BRANCA. PODE-SE OBSERVAR O OBSCURECIMENTO DO LIMBO. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

4.2.2.2 CROMOSFERA

Estendendo-se até cerca de 10.000 km acima da fotosfera esta camada possui uma temperatura de dezenas a centenas de milhares de graus. A densidade cai de 1-2 ordens de grandeza relativamente a fotosfera. Esta camada pode ser vista observando-se o Sol com um filtro especial na luz vermelha conhecido como H-alfa (correspondendo a primeira linha da serie de Balmer do átomo de Hidrogênio) (Figura 4.7). Utilizando este filtro pode-se distinguir as várias estruturas cromosféricas: proeminência, "praias" brilhantes, filamentos, fáculas, "plages" e espículos (Figura 4.7). A fronteira cromosfera-coroa é conhecida como região de transição, uma fina camada de poucas centenas de quilômetros na qual a temperatura se eleva dos valores cromosféricos até

cerca de 1-2 milhões de graus, já na base da coroa. Enquanto isso, a densidade decresce a valores de 10^9 -10^8 cm^{-3}, valores estes típicos da coroa solar calma (característica de períodos de baixa atividade solar).

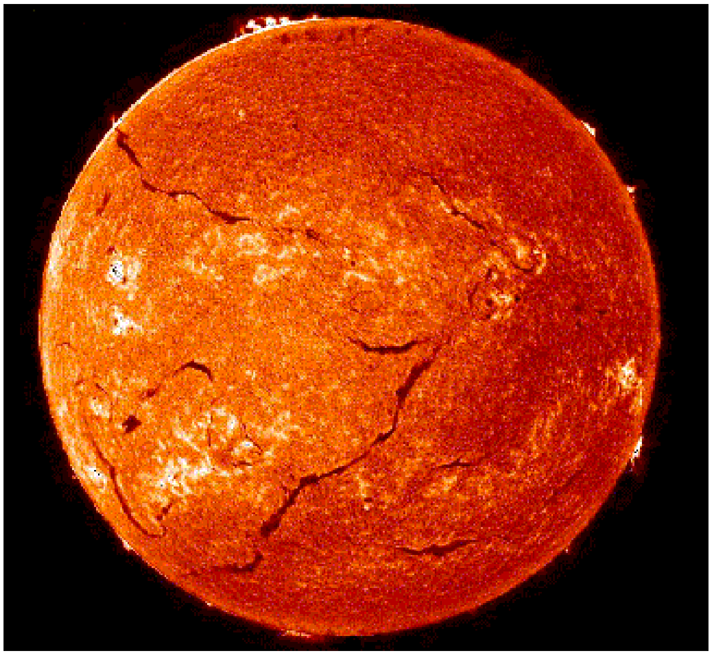


FIGURA 4.7 - IMAGEM DO SOL EM H-ALFA. PODE-SE IDENTIFICAR ESTRUTURAS COMO: FILAMENTOS - ESCUROS, FÁCULAS - CLARAS - E ESPÍCULOS - NO LIMBO. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

Com um filtro H-alfa pode-se identificar a cromosfera e distinguir as proeminências, que são estruturas que se erguem do limbo ou formam nuvens escuras sobre o disco. "Praias" brilhantes podem ser vistas sobre o disco associadas as manchas.

Qualquer nuvem de material visível acima da superfície solar observada no H-alfa pode ser chamada de proeminência. Quando observada no limbo aparece brilhante em contraste ao céu escuro, quando observada no disco é chamada por filamento escuro, apresentando-se assim por possuir apenas 10% do brilho do disco solar em H-alfa. Podem ser observadas em alguns pontos ao redor do disco escuro da Lua quando ocorre o máximo de eclipses solares totais. As proeminências podem ser classificadas pela forma como se apresentam em:

1- Calmas (de longa duração): proeminências ou filamentos localizados em ou próximos a regiões ativas.

2- Ativas (transitórias): proeminências geralmente associadas a "flare" no limbo ou precipitação de arcadas.

A proeminência eruptiva está entre os mais espetaculares eventos solares (Figuras 4.8 e 4.9), e é responsável por uma grande parcela das ejeções de massa coronal - CME.

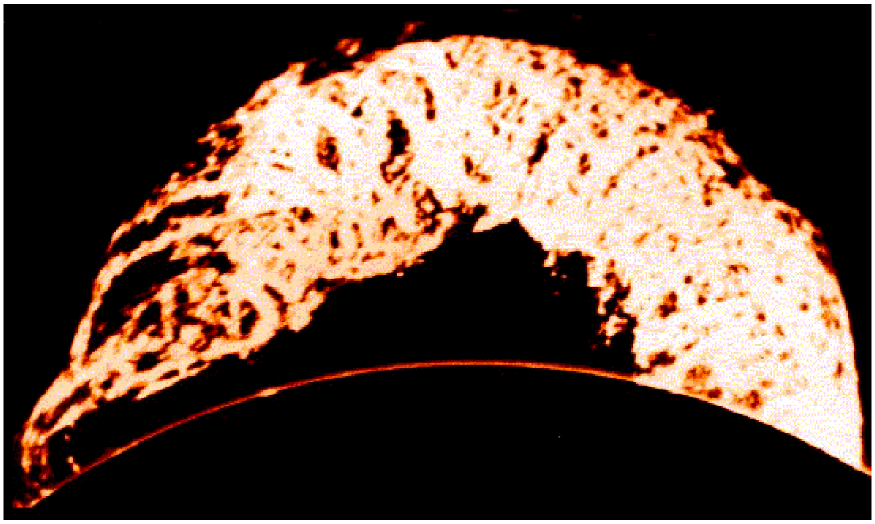


FIGURA 4.8 - PROEMINÊNCIA SOLAR OBSERVADA EM H-ALFA. (FONTE: HTTP://SCIENCE.MSFC.NASA.GOV/SSL)

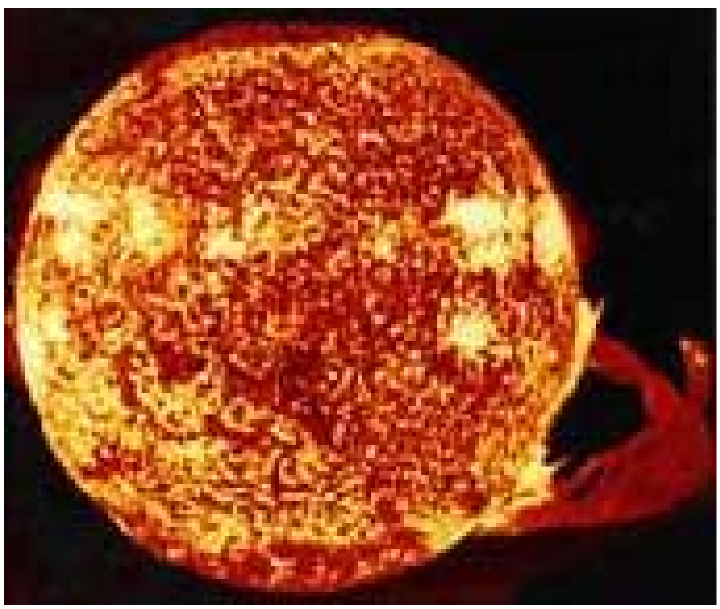


FIGURA. 4.9 - IMAGEM EM RAIOS-X DO SOL OBTIDA PELO SATÉLITE SKYLAB, EM 19 DE DEZEMBRO DE 1973. É MOSTRADA UMA DAS MAIS IMPRESSIONANTES PROEMINÊNCIAS JÁ REGISTRADAS. (FONTE: LABORATORIO ESPACIAL SKYLAB - NASA).

Todos os "flares" estão associados a filamentos, que normalmente desaparecem por erupção para cima. Os filamentos grandes se formam gradualmente. O primeiro passo ocorre quando uma região ativa se rompe em duas regiões unipolares. A seguir, as linhas neutras que se formam do rompimento desta e outras regiões ativas se unem para produzir um filamento extenso. Às vezes duram por várias rotações solares. Um filamento típico é menor, dura por apenas uma rotação solar e sofre ligeira alteração de forma quase todo dia. Além disso, podem ser usados para estimativas da rotação solar.

Espículos são pequenos jatos de matéria que se projetam em direção à coroa solar, com velocidades de cerca de 20 km/s a alturas de até 15.000 km. Estas estruturas, que surgem em aglomerados semelhantes a placas de grama, só podem ser vistas quando se observa a atmosfera solar - com um filtro H-alfa - em direção ao limbo (contorno) do disco solar. Esses aglomerados normalmente aparecem na borda de estruturas magnéticas, têm uma largura de aproximadamente 2.000 km e duração de cerca de 10 minutos, quando surgem novos conjuntos de espículos.

4.2.2.3 Coroa

A coroa é a parte mais externa da atmosfera solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. A coroa solar é melhor observada durante os eclipses totais do Sol, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. Desta forma durante o eclipse, como o disco solar é ocultado pela Lua, é possível observar e estudar a coroa (Figura 4.10).



Figura. 4.10- Exemplos de eclipses solares totais mostrando a coroa (Fonte: http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html)

A densidade desta camada é de 2-3 ordens de grandeza mais baixa do que aquela da cromosfera e sua temperatura é de 1-2 milhões de graus. Como a temperatura é extremamente alta, a coroa emite grande quantidade de raios-X. Além disso, a esta temperatura o gás encontra-se na forma de plasma - gás ionizado - produzindo assim os elétrons e íons que podem formar o chamado vento solar. Este vento se propaga por todo o sistema solar e eventualmente atinge a Terra.

Nesta camada também são observadas as chamadas regiões ativas, locais onde temperatura e densidade são elevadas além de possuírem campos magnéticos intensos (de centenas a poucos milhares de Gauss) distribuídos em formato de arcos com as pontas - pólos magnéticos - situados na fotosfera.

E' nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões ("flares") solares que ocorrem com maior freqüência nos períodos de máximo de atividade do ciclo solar (explicado adiante).

4.3 CAMPOS MAGNÉTICOS DO SOL

No início de um ciclo de atividade, o campo magnético solar é basicamente bipolar com os pólos, a princípio, coincidentes com os pólos heliográficos. Neste período, as linhas do campo magnético solar seguem a direção de meridianos que atravessam o Sol do pólo norte até o pólo Sul, ou vice-versa, passando perpendicularmente pelo Equador solar. A partir daí, como a rotação diferencial do Sol no Equador é mais rápida do que nos pólos, o gás que está preso às linhas de campo as arrasta consigo causando uma distorção em sua direção a partir de médias latitudes em direção ao Equador. A cada rotação, as linhas de campo vão sendo mais e mais arrastadas e distorcidas nas proximidades do Equador, até que a densidade de linhas de campo torna-se muito elevada e sua direção passa a ser praticamente paralela à linha equatorial solar. Nesse período, começa a ocorrer o afloramento das linhas de campo subsuperficial à superfície em forma de arcos e a emergência desses arcos magnéticos a partir da superfície em direção à cromosfera e coroa solares. A Figura 4.11 ilustra bem este processo durante um ciclo de atividade solar.

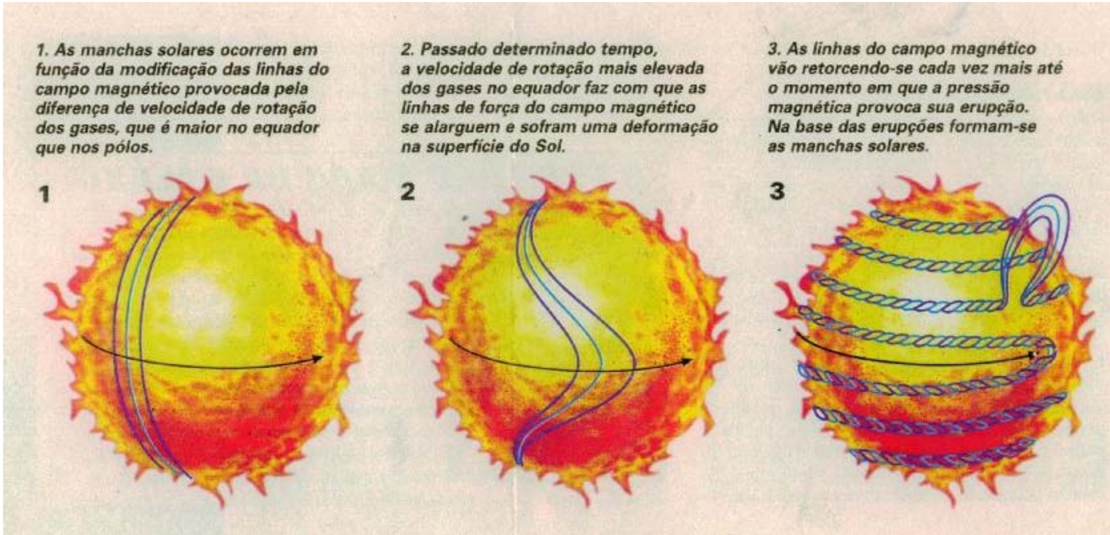


FIGURA. 4.11- EVOLUÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE (FONTE: REVISTA CIÊNCIA HOJE)

Passados cerca de 11 anos, o ciclo solar seguinte se inicia com as linhas de campo novamente seguindo os meridianos da superfície terrestre, porém com sentido invertido ao do ciclo solar anterior. Quando do início do próximo ciclo de atividade as linhas de campo novamente inverterão seu sentido, desta forma repetindo o mesmo sentido do penúltimo ciclo. É por este motivo que se costuma dizer que o período do ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos, correpondendo ao intervalo de tempo de 2 ciclos de atividade solar.

O campo magnético das chamadas regiões ativas, associadas às manchas solares, se estende para a atmosfera solar, cromosfera e coroa, assumindo uma forma característica de arco, na sua configuração mais simples, com seus extremos presos à superfície e correspondendo às polaridades magnéticas opostas. Entretanto, na grande maioria dos casos a geometria da configuração do campo magnético destas regiões é extremamente complexa, envolvendo a interação de vários arcos de tamanhos e dinâmica distintos. A Figura 4.12 representa de forma esquemática a possível geometria do campo magnético de uma região ativa evoluída.

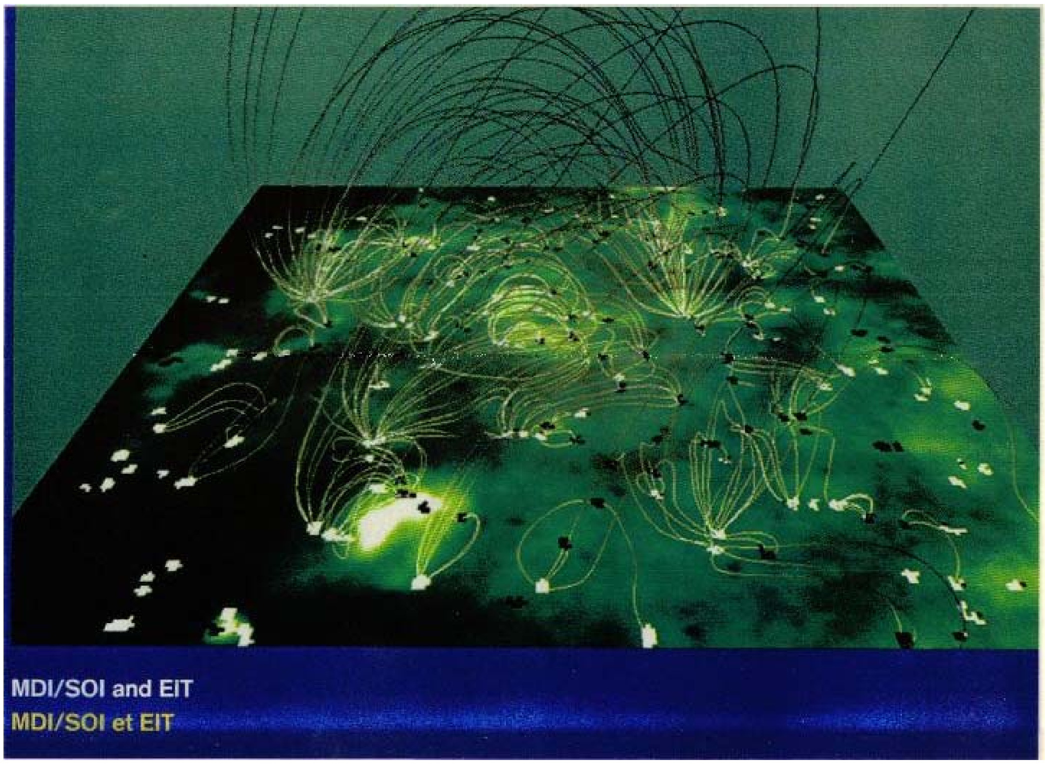


FIGURA. 4.12- CONFIGURAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE UMA REGIÃO ATIVA SOLAR EM ESTÁGIO EVOLUÍDO (FONTE: EXPERIMENTO EIT, SATÉLITE SOHO)

É esta complexidade que propicia as condições necessárias para a ocorrência de instabilidades que levam à liberação da energia armazenada no campo magnético gerando o fenômeno conhecido como “flare”, associado à explosão solar observada em outras faixas de comprimentos de onda que não o ótico.

Na superfície as polaridades magnéticas das manchas se distribuem de forma característica com a mancha “precursora”, caracterizando uma polaridade magnética, enquanto a mancha “seguidora”, possui a outra polaridade magnética. Entretanto, as polaridades magnéticas das manchas “precursora” e “seguidora” são opostas nos hemisférios norte e sul do Sol (vide Figura 4.13), invertendo suas polaridades a cada ciclo de atividade.

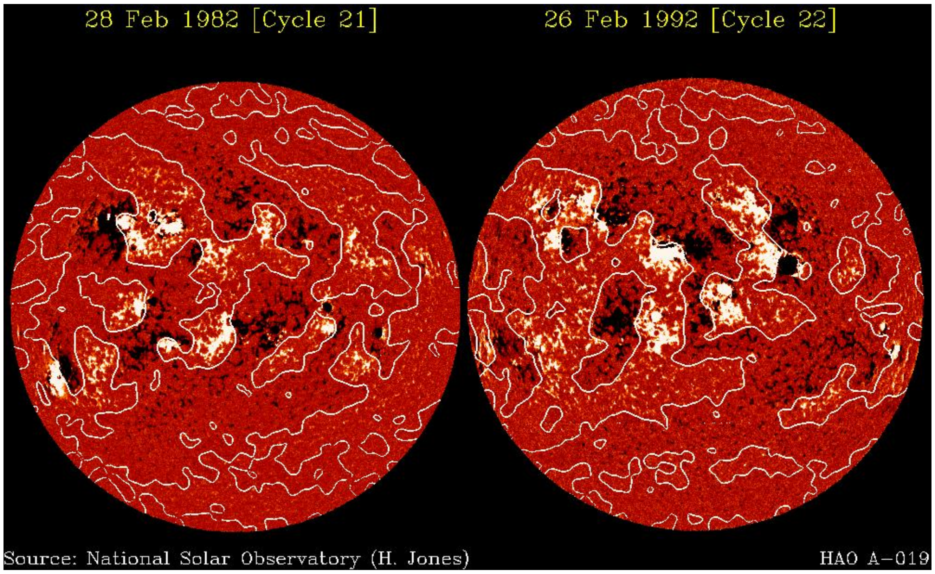


FIGURA. 4.13- (ESQUERDA) POLARIDADES DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" DO CAMPO MAGNÉTICO DE REGIÕES ATIVAS SOLARES NOS HEMISFÉRIOS NORTE E SUL DO SOL DURANTE UM CICLO DE ATIVIDADE SOLAR. (DIREITA) INVERSÃO DAS POLARIDADES MAGNÉTICAS DAS MANCHAS "PRECURSORA" E "SEGUIDORA" NO CICLO SEGUINTE DE ATIVIDADE (FONTE: NATIONAL SOLAR OBSERVATORY)

4.4 REGIÕES ATIVAS

Estas regiões estão situadas no interior de configurações de campo magnético em forma de ferradura ou arco, com linhas de fluxo magnético que se projetam pela cromosfera até a coroa solar, cujas extremidades - pólos magnéticos norte e sul - estão presas na fotosfera associados às manchas, como se fosse um imã gigante. Devido a ação destes campos, é nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões solares - "flare", que em português significa fulguração, historicamente devido às observações pioneiras efetuadas na luz visível. Estas explosões ocorrem com freqüência muito maior nos períodos de máxima atividade do ciclo solar.

4.5 CICLO DE ATIVIDADE SOLAR

A maioria das características da emissão solar está diretamente relacionada a atividade solar. O aspecto mais marcante da atividade é o ciclo de 11 anos, período no qual o número de manchas solares cresce e atinge um máximo, decrescendo em seguida. A Figura 4.14 mostra a evolução dos ciclos solares desde 1.600.

Estamos aproximadamente no máximo do atual ciclo (ciclo 23) de atividade solar. No início de um ciclo, as manchas pequenas surgem em número reduzido em latitudes solares mais elevadas, e vão se formando cada vez maiores e mais próximas ao equador solar aumentando em número, conforme o ciclo evolui em direção ao máximo de atividade, decrescendo gradativamente quando o ciclo decai em direção ao fim (Figura 4.15).

Este período leva cerca de 11 anos em média. Entretanto, como uma mesma polaridade magnética do Sol se repete sómente a cada 2 ciclos de atividade, o ciclo magnético solar é de cerca de 22 anos.

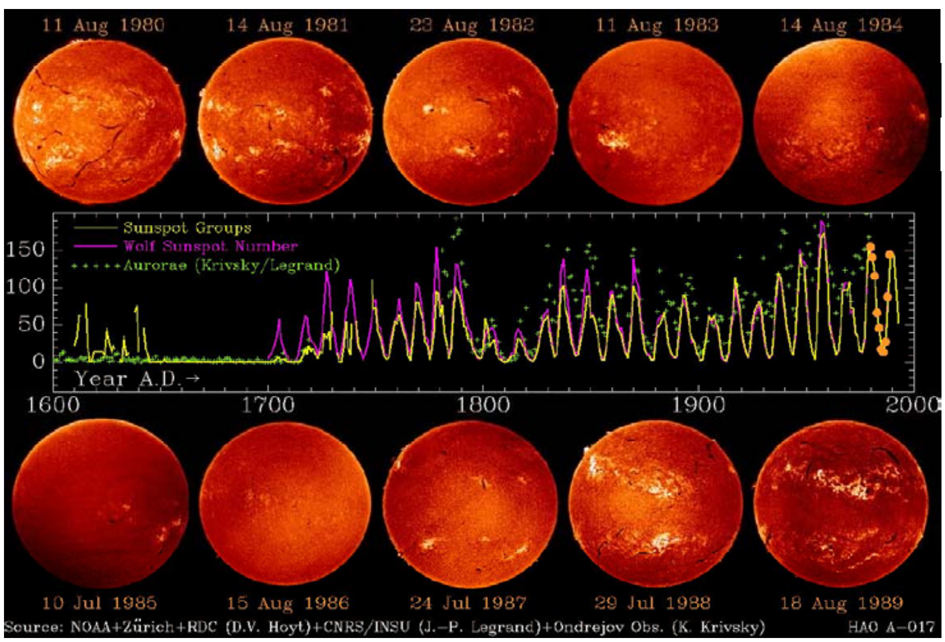


FIGURA 4.14 - DIAGRAMA DA EVOLUÇÃO DOS CICLOS SOLARES DESDE 1.600 (CENTRO). AS IMAGENS DO TOPO E DE BAIXO REPRESENTAM ASPECTOS DO DISCO SOLAR EM DIFERENTES ÉPOCAS AO LONGO DE UM CICLO: DE 1980 A 1989. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

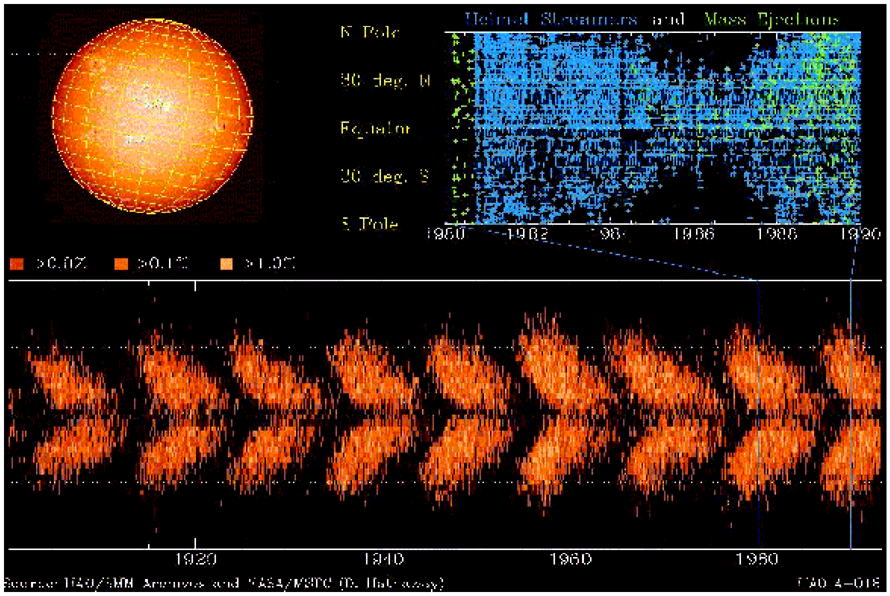


FIGURA 4.15 - "DIAGRAMA BORBOLETA" MOSTRANDO AS LATITUDES DE SURGIMENTO DAS MANCHAS SOLARES AO LONGO DOS CICLOS SOLARES. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

Durante o máximo do ciclo também ocorre um grande aumento na ocorrência de fenômenos energéticos que ocorrem nas regiões ativas associados as manchas. Estes fenômenos são chamados de explosões ou "flares" solares e estão descritos em detalhes a seguir.

A explosão solar pode estar associada a "ejeção de massa coronal" e também à ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra.

Outros efeitos importantes da atividade solar são os prejuízos causados em: comunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistema de fornecimento de energia, oleodutos, sistemas biológicos e também os danos das radiações ionizantes de origem solar que podem atingir missões espaciais tripuladas colocando em risco a vida dos astronautas pela exposição a grande quantidade de radiação.

4.6 EXPLOSÕES (‘FLARES”) SOLARES

As explosões solares foram observadas pela primeira vez, em 1 de Setembro de 1859, por R. C. Carrington and R. Hodgson, enquanto eles observavam manchas solares. Estas fenômenos caracterizam-se pela emissão de grandes quantidades de energia (10^{26} - 10^{32} erg), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas, para os fenômenos mais intensos.

A energia cinética/térmica liberada é proveniente da energia magnética armazenada na atmosfera solar, no interior de locais conhecidos como regiões ativas, como descrito anteriormente. Toda essa energia, que não chega a 10% de toda a energia emitida pelo Sol durante 1 segundo, provoca o aquecimento e aceleração dos elétrons, prótons e íons mais pesados presentes nos locais de liberação de energia e em sua vizinhança próxima. A interação das partículas energizadas com o meio ambiente provoca emissão de energia, na forma de radiação, que se distribui por grande parte do espectro eletromagnético (ver capitulo 2 para referência), estendendo-se desde ondas de radio quilométricas a raios-X e raios-gama, podendo produzir também a emissão de partículas (íons e elétrons) energéticos. Uma explosão solar típica produz uma quantidade de energia equivalente a cerca de 40 bilhões de vezes a energia da bomba atômica lançada em Hiroxima.

Uma explosão solar também pode estar associada a expulsão de grandes quantidades de matéria a velocidades que variam de centenas a poucos milhares de quilômetros por segundo. Este fenômeno é conhecido como ejeção de massa coronal - designado por CME - e também pode ocorrer dissociado de qualquer explosão solar.

Algumas explosões solares também estão associadas a ocorrência das chamadas tempestades magnéticas na Terra. Quando muito intensas causam grande perturbação na magnetosfera terrestre, podendo até mesmo causar um "blecaute". Uma explosão solar pode apresentar 3 fases distintas: 1) fase precursora, caracteriza o período em que a liberação de energia é ativada. Neste estágio são emitidos raios-X moles; 2) fase impulsiva, na qual as partículas - elétrons e prótons - são energizados até energias acima de 1 MeV - esta fase pode ser observada em cerca de 90% das explosões - 3) fase de decaimento onde um aumento e decaimento graduais em raios-X moles podem ser observados.

Não é possível ver uma explosão solar olhando para o Sol. JAMAIS DEVEMOS OLHAR DIRETAMENTE PARA O SOL. ISTO PODE CAUSAR CEGUEIRA E DISTÚRBIOS DA VISÃO TEMPORÁRIOS OU ATÉ PERMANENTES. Instrumentos científicos desenvolvidos para esta finalidade são utilizados para registrar as características da radiação emitida durante uma explosão solar. Radiotelescópios e telescópios ópticos são utilizados para as observações em solo terrestre. Enquanto isso, a observação das emissões em ultravioleta, raios-X e raios-gama só é possível através de instrumentos específicos a bordo de satélites no espaço. Isto porque as faixas de alta e media atmosfera bloqueiam a passagem destes comprimentos de onda até a superfície terrestre.

4.7 EJEÇÕES DE MASSA CORONAL (CME)

Como o próprio nome diz, são grandes quantidades de matéria (10^{15} - 10^{16} g), entremeadas de linhas de campo magnetico, que são expulsas do Sol durante um periodo de várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para o espaço exterior a velocidades de várias centenas a poucos milhares de km/s (Figura 4.16). Os CME são acelerados conforme vão se movendo para o espaço exterior. As primeiras evidencias deste tipo de evento dinamico foram obtidas a partir das observações de um coronografo a bordo do satelite OSO-7, durante o periodo de 1971 a 1973.

Ainda não se sabe qual a causa destes fenômenos, e também não está certo de onde se originam. Mais de metade destes fenômenos encontram-se associados a proeminências eruptivas. O restante que acompanha os "flares" costuma aparecer na forma de "surges" ou "sprays". Entretanto, em ambos os casos existe associação com instabilidades em proeminências. Alem disso, tambem podem ocorrer na ausencia de "flares" ou proeminências eruptivas. A frequencia dos CME varia com o ciclo de atividade solar, podendo ser observado cerca de um evento por semana, no minimo do ciclo, enquanto que podem ocorrer ate 2-3 eventos por dia nos periodos do maximo de atividade do ciclo. Sua morfologia varia desde um formato aproximado de jato ate um halo (arco), que pode circundar todo o disco solar (360°) em casos extremos. A maioria dos CME produzem ondas de choque que, quando se propagam em direção à Terra, percorrem a distância a partir do Sol em cerca de 2 dias.

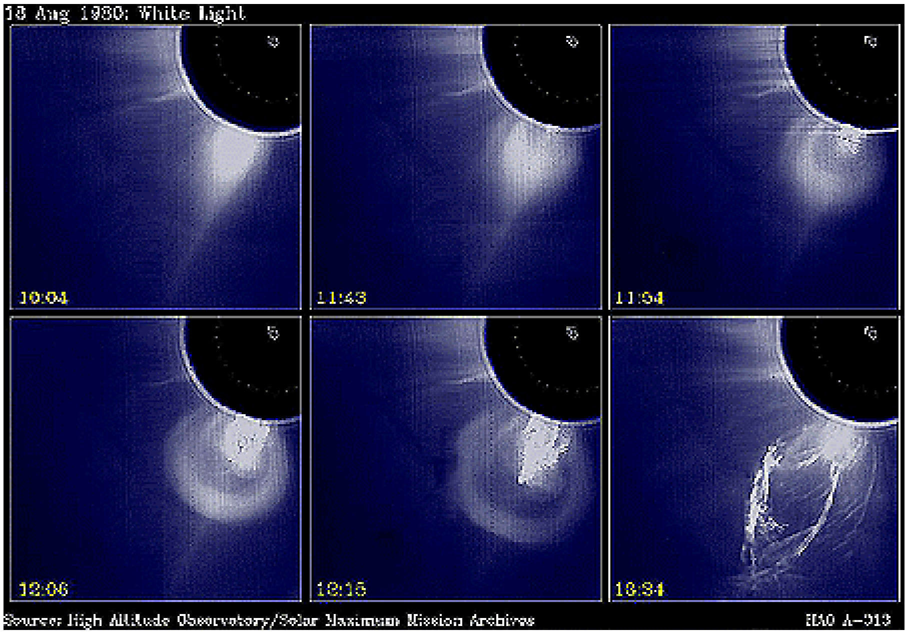


FIGURA 4.16 - SEQÜÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE UMA CME. (FONTE: HTTP://WWW.HAO.UCAR.EDU:80/PUBLIC)

A Figura 4.17 mostra uma comparação das dimensões de uma CME.

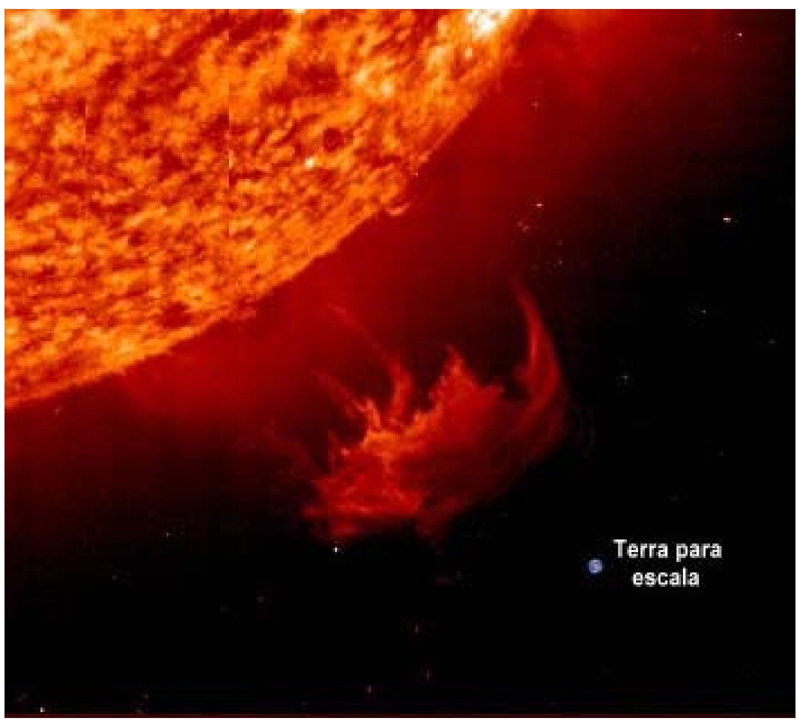


FIGURA 4.17 - ILUSTRAÇÃO DAS DIMENSÕES DE UMA CME EM COMPARAÇÃO COM O TAMANHO DA TERRA. (FONTE: HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/ESOL.HTML)

Os CME podem quebrar o fluxo do vento solar - explicado a seguir - e produzir perturbaçoes que atingem a Terra as vezes com resultados perigosos e nocivos as atividades humanas. Este fenomeno, em conjunto com os "flares" solares afeta diretamente o chamado "clima espacial". Atualmente, o experimento "Large Angle and Spectroscopic Coronograph (LASCO)", a bordo do satelite "Solar Heliopheric Observatory (SOHO)", observa o Sol para registro de CMEs diariamente.

4.8 RELAÇÕES SOLARES-TERRESTRES

Os fenômenos associados a atividade solar estão mais estreitamente relacionados com alguns fenômenos que ocorrem na Terra do que podemos imaginar. Tal como os "flares", o estudo dos CME também tem implicações importantes para a compreensão e a previsão dos efeitos da atividade solar na Terra e espaço. Quando um CME atinge a Terra pode gerar uma tempestade geomagnética cujos efeitos vão desde danos nas comunicações via satelite ate a producao de "blecautes". Além disso, as ondas de choque produzidas pelos CME, na sua interação com o meio interplanetário, geram partículas energéticas que podem danificar equipamentos eletronicos e irradiar os astronautas de missões tripuladas no espaço com doses excessivas de radiações ionizantes. Isto ocorre porque no espaço não existem a magnetosfera e as camadas protetoras da atmosfera terrestre que absorvem e espalham a quase totalidade dessas radiações originadas fora da Terra. Por sua vez, os "flares" solares ionizam diretamente a ionosfera terrestre e também liberam partículas energéticas no espaço.

Portanto, é necessário um maior conhecimento dos fenômenos de CME e "flares" para se entender melhor e prever o "clima espacial" e os efeitos da atividade solar na Terra.

4.9 VENTO SOLAR

Trata-se de um fluxo de elétrons e íons positivos que são expulsos da coroa solar em alta velocidade (cerca de 600 km/s) e propagam-se pelo meio interplanetário. Estas partículas se originam dos chamados buracos coronais e escapam do Sol para o espaço através das linhas abertas do campo magnético. Eventualmente, este vento atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como aurora - quando

interagindo com os gases da alta atmosfera - quanto perturbações no campo magnético - quando interagindo com a magnetosfera terrestre. O vento solar quando interage com a magnetosfera terrestre causa sua deformacao na direcao da linha Sol-Terra, tanto no espaco entre o Sol e a Terra como na direcao do espaco exterior, como pode ser visto na Figura 4.18.

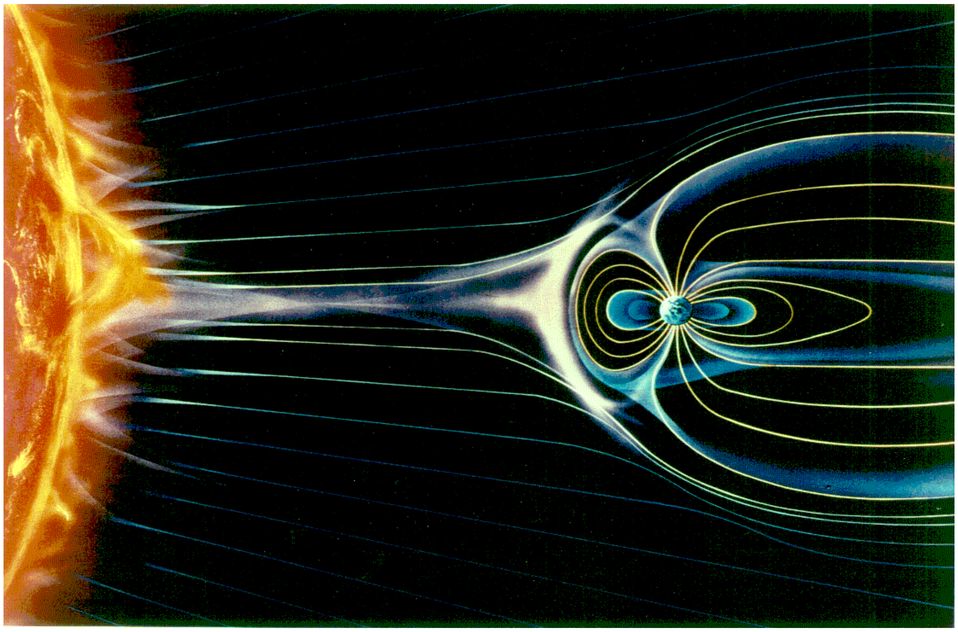


FIGURA 4.18 - VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE. A AÇÃO DO VENTO SOLAR PRESSIONA A MAGNETOSFERA EM DIREÇÃO AO ESPACO EXTERIOR.

Quando as partículas energéticas emitidas pelo Sol interagem com os gases da alta atmosfera terrestre, nas proximidades das regiões polares da magnetosfera terrestre, ionizam os átomos desses gases. Os íons e elétrons desses átomos ionizados, por sua vez, se recombinam para formar um átomo neutro. No momento em que isto acontece é emitida uma luz de cor característica do átomo que está se recombinando, e que também depende da energia das partículas que provocaram a ionização daquele átomo. Como a atmosfera terrestre é composta por vários gases e a energia das partículas incidentes não é fixa pode-se observar luz de várias cores e com diversos padrões difusos. Este fenômeno é chamado de aurora (dois exemplos na Figura 4.19). Ocorre em altas latitudes terrestres podendo ser observado a olho nu, com as designações de boreal, no hemisfério norte, e austral, no hemisfério sul.



FIGURA 4.19 - EXEMPLOS DE FOTOS DE AURORAS OBTIDAS EM ALTAS LATITUDES. NA FIGURA SUPERIOR E MOSTRADA UMA AURORA OBSERVADA EM 20/03/01, ENQUANTO NA INFERIOR OUTRA AURORA OCORRIDA EM 17/04/01. (FONTE: HTTP://WWW.SPACEWEATHER.COM).

4.10 IMPORTÂNCIA DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS SOBRE O SOL

As atividades humanas estão cada vez mais dependentes de alta tecnologia. Por sua vez, os produtos dessa alta tecnologia são extremamente sensíveis a atividade solar e seus efeitos associados que podem atingir a Terra. Logo, as atividades humanas são direta ou indiretamente perturbadas pelos efeitos da atividade solar. Então, por questão de segurança, saúde e manutenção das atividades humanas, é muito importante a investigação científica das origens dos fenômenos solares explosivos e da atividade solar, e seus possíveis efeitos na Terra com o intuito de minimizar os prejuízos que causam nas atividades humanas.

4.11 BIBLIOGRAFIA

Bishop Web Works. **Spaceweather.com.** [on-line]. <http://www.spaceweather.com>, 22/06/2001.

Bishop Web Works. **Sunspots and the solar cycle.** [on-line]. <http://www.sunspotcycle.com>, 22/06/20001.

Charbonneau, P.; White, O. R.. **The sun: a pictorial introduction.** [on-line]. <http://www.hao.ucar.edu:80/public/slides/slides.html>, 22/06/2001.

Hathaway, D. H. **Solar physics.** [on-line]. <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar>, 22/06/2001.

Kippenhahn, R. **Discovering the secrets of the sun.** Chichester: John Wiley & Sins, 1994.

Oliveira Filho, K. S.; Saraiva, M. F. O. **O Sol - a nossa estrela.** [on-line]. <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>, 22/06/2001.

Zirin, H. **Astrophysics of the sun.** New York: Cambridge University Press, 1988.

Capítulo 5

ESTRELAS

Hugo Vicente Capelato*

* e-mail: hugo@das.inpe.br

ESTRELAS

LISTA DE FIGURAS

5.1 INTRODUÇÃO

Vamos começar o nosso estudo por uma inspeção mais ou menos superficial na "floresta" de estrelas que vemos nos céus. A primeira coisa que notamos é que elas são fontes de luz muito mais fracas que o Sol. A segunda coisa é que suas cores aparentes são variáveis, desde um branco azulado da maioria, até o um amarelo avermelhado, um pouco mais raro. Há ainda um terceiro aspecto, embora este já não seja muito óbvio a olho nu: é que a maioria das estrelas agrupam-se em pequenas famílias de dois, três ou mais membros. Um bom exemplo disto é a estrela Alfa do Centauro, a estrela mais próxima de nós, que na verdade é um sistema *triplo* de estrelas. Outro é o grupo de 7 estrelas que formam as *Plêiades,* discutido mais adiante[1]. Na verdade quase metade das estrelas fazem parte de sistemas duplos, de apenas dois membros, chamados *estrelas binárias*. A maioria destas estrelas duplas, embora vivam juntas, distam entre si várias *unidades astronômicas* (uma unidade astronômica, UA, é a distâncias da Terra ao Sol; veja o Cap. 1), movendo-se uma em torno da outra com períodos de vários anos. Existem no entanto estrelas binárias cuja separação é muito menor e que se movimentam com períodos de apenas algumas horas! Estas estrelas estão tão próximas uma da outra que são capazes de trocar entre si seu material envoltório. Muitas vezes esta troca ocorre de maneira um pouco violenta, e então podem acontecer explosões locais que expulsam a matéria para longe do sistema. Em outros sistemas binários, onde acontece que uma das componentes seja uma estrela muito compacta e densa, o material da companheira flui mais calmamente, formando um disco luminoso em torno da estrela compacta.

A distância média que separa estrelas vizinhas (ignorando os sistemas binários) é de cerca de 4 anos-luz. Esta distância eqüivale a 253.000 unidades astronômicas ou a 27 milhões de vezes o diâmetro do Sol: o espaço entre as estrelas é imenso, comparado com o tamanho das estrelas, ou mesmo do Sistema Solar.

---

[1] Mas não confunda estes grupos estelares de que falamos aqui, com as constelações tradicionais. Estas, na sua grandíssima maioria, não passam de configurações *aparentes* de estrelas, sem nenhuma relação entre si (veja o Cap. 1).

5.2 A COR E O BRILHO DAS ESTRELAS

Assim como o Sol, as estrelas são bolas de gás muito quente que emitem sua radiação para o espaço. Há duas propriedades das estrelas que são de interesse imediato: a sua cor e o seu brilho. A **cor** de uma estrela é determinada pela *temperatura* em que se encontra a sua superfície[2] , enquanto que o seu **brilho** é determinado pela *quantidade de luz que ela irradia por segundo*, através de toda a sua superfície. Podemos construir um diagrama de cor *versus* brilho das estrelas, como na Figura 5.1, onde cada ponto indica o brilho e a cor de uma determinada estrela. Um diagrama deste tipo é conhecido como diagrama de Hertzprung-Russel (HR).

O Sol tem uma cor intermediária amarelo-claro. A sua temperatura na superfície é de cerca de 5 800 K (graus Kelvin[3]). Uma grande parte das estrelas é parecida com o Sol, com cores e tamanhos comparáveis. Outras estrelas são bem maiores e vermelhas: são as estrelas *gigantes vermelhas*, cuja temperatura na superfície é da ordem de 3 000 K. Há ainda estrelas de cor branca e tamanho muito pequeno, quase tão pequenas quanto a Terra: são as estrelas *anãs brancas*, que tem temperaturas superficiais da ordem de 10000 K.

O brilho[4] de uma estrela é a taxa com que a sua energia luminosa é emitida. O brilho de uma estrela depende somente da sua temperatura superficial e da área total de sua superfície. As estrelas gigantes vermelhas, de temperaturas relativamente baixas, tem uma grande área superficial, por isso são estrelas brilhantes, luminosas. A estrela Betelgeuse, na constelação de Orion, é um bom exemplo de uma estrela gigante vermelha. Já as estrelas anãs brancas tem altas temperaturas superficiais mas, por serem muito pequenas, tem áreas superficiais também muito pequenas e são muito pouco brilhantes: impossível enxergar qualquer uma delas a olho nu! No diagrama H-R da

[2] **Quanto mais quente for um objeto, mais azul será a radiação por ele emitida**. Esta lei da física foi estabelecida em 1898 por Wilhem Wien. Podemos vê-la em funcionamento, observando a cor da chama de um fogão de cozinha: uma chama bem azulada indica uma chama quente, enquanto que uma chama mais avermelhada indica uma chama mais fria.

[3] Para obter a temperatura em graus Celsius (^{o}C), subtraia 273 do valor em graus Kelvin. A temperatura da superfície do Sol portanto é 5 527 ^{o}C.

[4] Neste capítulo estaremos sempre falando do brilho *absoluto* da estrela, diferente do seu brilho *aparente* o qual varia conforme a distância em que ela se encontra – veja o Cap. 2 a este respeito.

Figura 5.1 nós desenhamos também as linhas tracejadas que indicam os lugares onde devem cair as estrelas de mesmo raio[5]: é fácil ver quão correto foi batizar de *Super*-gigante uma estrela como Betelgeuse.

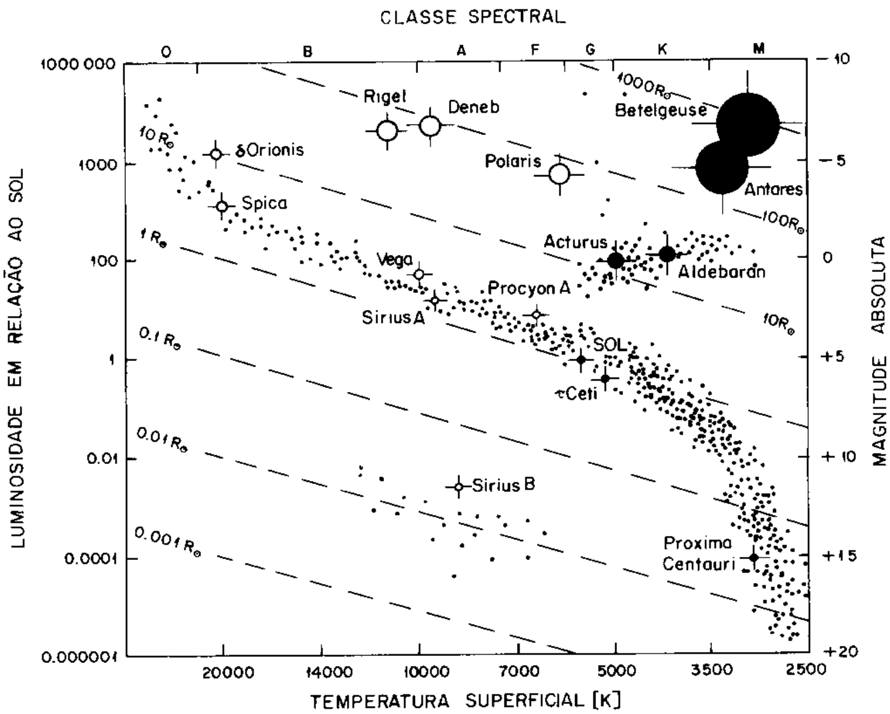


FIGURA 5.1 - O DIAGRAMA H-R, QUE MOSTRA COMO AS ESTRELAS SE DISTRIBUEM CONFORME SUA COR (TEMPERATURA) E BRILHO (LUMINOSIDADE). AS LINHAS TRACEJADAS INDICAM COMO SE POSICIONAM AS ESTRELAS DE MESMO TAMANHO FÍSICO (I. É, MESMO RAIO). AS ESTRELAS "ANÃS" SITUAM-SE NAS REGIÕES INFERIORES DO GRÁFICO E AS "GIGANTES" NAS REGIÕES SUPERIORES. ALGUMAS ESTRELAS CONHECIDAS FORAM DESTACADAS COM SÍMBOLOS INDICANDO O SEU TAMANHO RELATIVO (SEM SEGUIR NENHUMA ESCALA VERDADEIRA).

Muitas vezes nós estamos interessados na quantidade **total** de radiação[6] emitida por segundo pela estrela. Uma parte desta radiação pode nem ser detectável pelos nossos

---

[5] Medidos com relação ao raio do Sol, simbolizado por $R_\odot$ ($R_\odot$ = 696.000 km)

olhos. Neste caso, no lugar de falar de brilho para a radiação total (visível e invisível), falamos da *luminosidade* da estrela. A luminosidade de uma estrela é a potência que ela é capaz de gerar no seu interior, em geral através de reações nucleares *de fusão* (ao contrário dos reatores de energia do tipo dos instalados em Angra dos Reis, aonde as reações nucleares são *de fissão* – adiante discutiremos isso). A luminosidade do Sol é $3{,}8 \times 10^{26}$ Watts, valor que simbolizamos por $L_\odot$. Para as outras estrelas, preferimos medir suas luminosidades com referência à luminosidade do Sol: a estrela Betelgeuse, por exemplo, tem luminosidade de $10^4\,L_\odot$, quer dizer, ela é 10 000 vezes mais luminosa que o Sol. No diagrama H-R da Figura 5.1, o brilho das estrelas está expresso em termos da sua luminosidade, enquanto a cor está em termos da sua temperatura superficial.

5.2.1 A SEQUÊNCIA PRINCIPAL DE ESTRELAS

Quando examinamos como se distribuem os pontos correspondentes às estrelas no diagrama H-R (Figura 5.1), algo notável aparece: os pontos não se distribuem aleatoriamente por todo o diagrama. Ao contrário, eles tendem a se concentrar em algumas regiões definidas. A maioria das estrelas, incluindo o nosso Sol, ficam numa faixa que corre mais ou menos diagonalmente pelo diagrama. Esta faixa é denominada *Sequência Principal*, e as estrelas que aí se localizam são chamadas de *estrelas da Sequência Principal*. Aqui, as estrelas *mais vermelhas* - mais frias superficialmente – são as *menos luminosas*, enquanto que as estrelas <u>mais azuis</u> - mais quentes - são as <u>mais luminosas.</u>

As massas das estrelas pode variar bastante. Na sequência principal, as estrelas que têm <u>maior massa</u> são as <u>mais brilhantes</u> e, portanto, <u>mais azuis e mais quentes</u> superficialmente. Ao contrário, as estrelas de *menor massa* são as *menos brilhantes* e, portanto, *mais vermelhas e mais frias*. As massas das estrelas na sequência principal variam bastante. Uma fração considerável de estrelas tem massas entre 0,1vezes a 10 vezes a massa do Sol[7], mas a maior parte tem massas da ordem de $0{,}8\,M_\odot$, ou pouco

---

[6] Radiação <u>eletromagnética</u> ! Recorde das lições do capítulo **2**: a *luz* que vemos é uma forma de radiação <u>*eletromagnética*</u>, assim como o são as ondas de *radio* ou os *raios-X*.

[7] simbolizado por $M_\odot$ - $M_\odot = 2 \times 10^{33}$ gramas.

menor: são as anãs-vermelhas, muitas vezes encontradas como companheiras invisíveis de estrelas normais. Mas existem também algumas estrelas cujas massas podem chegar até a 60 $M_{\odot}$. Essas estrelas são 10 milhões de vezes mais brilhantes que o Sol: se Alfa do Centauro fosse uma delas, brilharia no nosso céu tanto quanto a Lua cheia! As estrelas da sequência principal também nunca são muito grandes: os seus raios variam de 0,001 até 25 vezes o raio do Sol, no caso das estrelas mais brilhantes.

Todas as estrelas da sequência principal produzem a energia que irradiam através de reações nucleares muito semelhantes àquelas que ocorrem durante a explosão de uma bomba-H: *convertendo núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio*. Cerca de 80% da massa destas estrelas está na forma de hidrogênio, de modo que fica claro que elas tem combustível para passar muito tempo na sequência principal. As de maior massa, porque são mais brilhantes, devem passar um tempo menor: como sua luminosidade é desproporcionalmente maior, elas devem "queimar" seu hidrogênio mais rapidamente que as estrelas com massa menor.

Quando o "combustível" hidrogênio começa a faltar no centro das estrelas da sequência principal, elas começam a sair da sequência principal. O seu destino então será o de se expandirem e se transformarem em estrelas gigantes vermelhas.

5.2.2 ACIMA DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

No diagrama H-R, acima da sequência principal, encontramos as *estrelas gigantes vermelhas*. Estas estrelas são esferas distendidas de gás – algumas vezes chegam a ser maiores que a órbita da Terra em torno do Sol - frias e luminosas. Embora a sua temperatura superficial seja baixa, as suas áreas superficiais são tão grandes que fazem com que elas tenham altíssimas luminosidades, de centenas a milhares de vezes superiores à do Sol.

As gigantes vermelhas são estrelas que já esgotaram boa parte de suas reservas de hidrogênio: como, então, podem emitir tanta energia para serem assim luminosas ? Estas estrelas deixaram a sequência principal e agora as *suas regiões centrais estão se contraindo*, na busca de fontes alternativas de energia nuclear. Nesta contração, uma parte da *energia potencial gravitacional* contida na estrela é liberada. É esta

energia que provê a sua luminosidade. Mas isto somente por curtos períodos, até que outros “combustíveis” nucleares possam entrar em “ignição”. Adiante iremos rever estas questões com maiores detalhes.

5.2.3 ABAIXO DA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Abaixo da sequência principal encontram-se as estrelas anãs-brancas. Estas estrelas tem aproximadamente o tamanho da Terra, embora sua massa seja da ordem da massa do Sol. São, portanto, estrelas muito densas. Como elas são pequenas, embora tenham altas temperaturas superficiais, não são muito luminosas.

As anãs-brancas são o último estágio da evolução de muitas estrelas. Nesta fase a sua luminosidade é unicamente devida à energia térmica ou seja, calor, ainda disponível: a estrela se esfria lentamente. Mais de 10% das estrelas na nossa vizinhança são anãs-brancas, mas elas são muito difíceis de serem vistas, dada a sua fraca luminosidade.
Nem todas as estrelas, no entanto, terminam suas carreiras como anãs-brancas. Algumas tornam-se estrelas de neutrons, e outras ainda transformam-se em buracos negros.

5.2.4 AS ESTRELAS VARIÁVEIS

A maioria das estrelas têm brilho praticamente constante no tempo. Ocorrem sempre pequenas variações, erráticas, em geral imperceptíveis a olho nu. Isto sem contar, é claro, com a lenta – lentíssima - variação de brilho devido ao fato que as estrelas evoluem, mudando lentamente de posição no diagrama HR. Mas isto só seria notável em escalas de tempo de 10.000 ou 100.000 anos ! Contudo, em certas fases da vida estelar a evolução pode muito mais rápida e então as variações de brilhos podem vir a ser mesmo espetaculares. Mais adiante voltaremos a isto.

Existe também uma minoria de estrelas cujo brilho varia periodicamente, aumentando e diminuindo em escalas de meses , dias ou mesmo em escala de horas. Estas estrelas são chamadas de *estrelas variáveis*. Na verdade, mais de 25% de todas as estrelas variáveis não tem de fato o seu brilho variável: são na realidade sistemas binários *eclipsantes,* nos quais a aparente variação do brilho se deve ao fato de uma das estrelas componentes

eclipsar a outra, ao passar pela sua frente.

As estrelas variáveis “de fato” são estrelas que periodicamente se expandem e se contraem, pulsando tanto em brilho como em tamanho. Por isso são também denominadas *estrelas pulsantes*. Uma importante classe de estrelas pulsantes são as estrelas conhecidas como *cefeidas*. São estrelas que se encontram acima da sequência principal, com brilhos de 100 a 10 000 vezes o do Sol. Têm cores ligeiramente mais avermelhadas que o Sol. Seus períodos de pulsação variam entre 3 a 50 dias, e em cada pulsação seus brilhos podem variar de até 5 vezes em relação ao seu brilho médio. As cefeidas são estrelas de massa maior que o Sol e que já evoluíram além do estágio de gigantes vermelhas. Elas oscilam porque assim podem liberar mais facilmente a radiação aprisionada no seu interior.

As cefeidas são também importantes porque podem ser usadas como indicadores de distância. Acontece que o período de pulsação de uma cefeida está relacionado com o seu brilho média: quanto maior este, maior será o período. Então, se medirmos o período de uma cefeida, coisa relativamente fácil de fazer, poderemos calcular a sua luminosidade. Comparando esta com o brilho aparente da estrela, podemos calcular a sua distância. É bom lembrar que a medida de distâncias, sobretudo as mais longínquas, é uma das tarefas mais difíceis na astronomia. Por causa disto, uma das missões mais importantes do telescópio espacial Hubble foi medir os períodos de estrelas cefeidas pertencentes às galáxias mais próximas de nós: assim, conseguiu-se medir a distância destas galáxias, coisa impossível até então.

5.3 O INTERIOR DAS ESTRELAS

5.3.1 AS ESFERAS DE GÁS QUENTE

As estrelas são enormes bolas de gás muito quente e de radiação eletromagnética, que irradiam energia no espaço interestelar. Esta energia, que é emitida na superfície da estrela, é produzida no seu interior mais profundo, sendo lentamente difundida por toda a estrela até escapar pela sua superfície. Todos nós sabemos que o calor, isto é, a energia

térmica, sempre flui das regiões quentes para as regiões frias. Isto implica que o centro da estrela deve ser muito mais quente que a sua superfície. Na verdade, a temperatura central das estrelas é estupidamente grande. No Sol, por exemplo, a temperatura central deve atingir os $15x10^6$ K, quer dizer, algo como 2.500 vezes maior que a sua temperatura na superfície. Na sequência principal, a temperatura central das estrelas varia de maneira aproximadamente proporcional à massa da estrela: uma estrela de $60M_\odot$ da sequência principal dever ter então uma temperatura central da ordem de $60xT_{central\ do\ Sol} = 900x10^6$ K, quase 1 bilhão de graus !!!

As estrelas são bolas de gás quente *auto-gravitantes* : essa palavra significa que a estrela é mantida coesa por causa da ação das forças gravitacionais geradas por ela própria, isto é, por sua própria massa. Imagine um pedacinho da estrela a uma certa distância do centro da estrela: a força de gravidade produzida pelo resto da massa da estrela *interior* à posição do nosso pedacinho é que produz o seu peso, que o puxa em direção ao centro da estrela. O peso do nosso pedacinho tem que ser contrabalançado por uma outra força, senão ele cairia em direção ao centro e, como ele, o restante da estrela, que assim iria colapsar. Esta força é exercida pela pressão do gás quente que constitui o interior da estrela[8]. Se, numa fantasia, fosse possível "desligar" a pressão do gás no interior do Sol, bastaria 1 hora para ele colapsar e se transformar num buraco negro.

O balanço entre a pressão do gás (na verdade a diferença, ou gradiente, de pressão) e a gravitação é fácil de ser entendido. Considere no interior da estrela uma camada esférica imaginária, feita do gás contido entre as suas duas superfícies, tal como na Figura 5.2.
Do lado da superfície interna da camada, a pressão do gás da estrela empurra a camada para fora, enquanto que na superfície externa, o gás da estrela *press*iona a camada para dentro. Como a estrela está em equilíbrio, a camada não se move: será o próprio peso da camada que irá contrabalançar a diferença entre as pressões externa e interna, de modo que:

Diferença de pressões = peso da camada [9]

[8] Além do gás, o campo de radiação eletromagnética também exerce uma pressão que contribue significativamente para o equilíbrio da estrela.

[9] Mais corretamente esta equação deveria ser escrita assim: $P_{int}*A_{int} - P_{ext}*A_{ext}$ = *peso da camada*, sendo P_{ext} e P_{int} as pressões externa e interna respectiva e A_{ext} e A_{int} as áreas externa e interna, respectivamente, da camada.

Esta expressão é conhecida como *equação de equilíbrio hidrostático*. A estrela pode ser imaginada como constituída por um grande número de camadas esféricas concêntricas, de modo que, à medida que vamos prosseguindo em direção ao centro, a pressão do gás *cresce* ao passarmos de uma camada para outra. No centro, a pressão atinge o seu valor máximo. Nas regiões centrais das estrelas a pressão do gás atinge valores fantasticamente grandes: no centro do Sol ela é de 10^{11} atm (100 bilhões de atmosferas), o que equivaleria, na Terra, a uma coluna pesando 100 milhões de toneladas, cuja base fosse uma moedinha de 1 centavo!

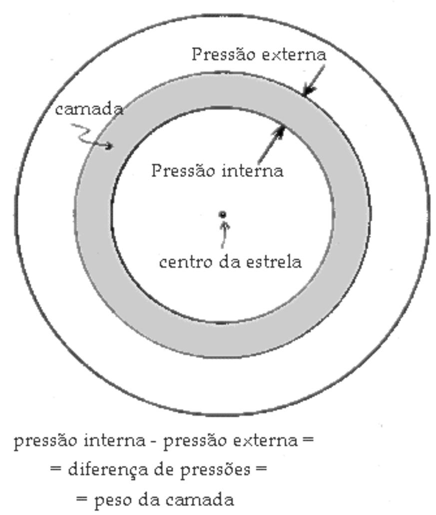


FIGURA 5.2

5.3.2 POR QUE AS TEMPERATURAS SÃO TÃO ALTAS ?

A densidade média de massa do Sol é cerca de 1,4 g/cm^3 (gramas por centímetro cúbico), isto é, 1,4 vezes a densidade da água. No entanto, a densidade no centro do Sol é mais de 100 vezes maior, aproximadamente 150 g/cm^3. Não existe nada parecido no mundo das substâncias sólidas ou líquidas: nenhum sólido ou líquido pode existir a estas densidades, suportando as enormes pressões que prevaleceriam. Na verdade, a única forma de matéria possível no Sol (e nas estrelas em geral), é a forma gasosa, a temperaturas extremamente altas.

A pressão de um gás é proporcional ao produto da sua temperatura pela sua

densidade. Resulta, então, que para termos altas pressões necessitamos altas temperaturas. Esta é a razão das altas temperaturas no interior das estrelas: a necessidade de grandes pressões que equilibrem a força de gravidade produzida pela enorme quantidade de massa que as estrelas contém.

Um gás a temperaturas de milhões de graus não se parece em nada com aqueles que estamos familiarizados (p. ex., a atmosfera em que vivemos). Os átomos se movem a altíssimas velocidades, centenas de quilômetros por segundo [10] . Quando eles colidem uns com os outros – e isto acontece com frequência nestes meios tão densos – a interação é tão violenta que todos os elétrons são arrancados e os átomos tornam-se completamente ionizados. O gás então consiste, de fato, de núcleos atômicos e elétrons movendo-se independentemente. A radiação que é produzida neste gás quente e denso é constituída de raios X intensos, e não daquela radiação luminosa que escapa da superfície relativamente fria da estrela. No entanto, cada fóton de raios X do interior estelar viaja em média somente cerca de 0,0001 cm, antes de ser capturado ou desviado por algum núcleo ou elétron do gás.

Isto explica porque as estrelas, ao contrário dos planetas, são intrinsecamente luminosas. No seu interior elas são extremamente quentes devido às altas pressões necessárias para contrabalançar a gravidade. É a radiação produzida por este gás quente, lentamente escapando em direção à superfície, que é responsável pela luminosidade da estrela. As reações nucleares que ocorrem no seu interior compensam esta perda de energia, de modo que a estrela pode se manter luminosa por grandes períodos de tempo. Assim, em última análise, as estrelas são intrinsecamente luminosas por causa das enormes massas que contém (e não por causa da energia nuclear produzida no seu interior).

5.3.3 CONVECÇÃO E ONDAS SONORAS NAS ESTRELAS

A radiação que é produzida originalmente nas regiões centrais das estrelas está sendo constantemente desviada, ou então absorvida e reemitida, pelas partículas (núcleos +

---

[10]) A velocidade média das partículas de um gás varia aproximadamente com a raiz quadrada da sua temperatura (mais exatamente, com $\sqrt{T/m_p}$, onde m_p é a massa da partícula). Na nossa atmosfera, a temperaturas de 27°C = 300 K, as moléculas de oxigênio tem velocidades médias de aproximadamente 0,5 km/s

elétrons) do gás[11]. Estes processos dificultam, ou mesmo bloqueiam, o fluxo da radiação em direção à superfície (como na Figura 5.3). Esta resistência ao fluxo da radiação é chamada de *opacidade*. Quando a opacidade é alta, como muitas vezes acontece, o gás bloqueia a radiação e então o transporte de calor das regiões de alta temperatura em direção a superfície tem que ser feito por *convecção*: o gás se põe em movimento formando correntes ascendentes quentes e correntes descendentes frias, carregando para cima a energia térmica do interior. No Sol, as partes mais externas tem opacidade muito alta, o que faz que a radiação proveniente do interior não consiga se difundir através delas. Em consequência as camadas mais externas do Sol, chamadas de *envoltória*, entram num estado de convecção parecido com o de uma chaleira em ebulição. É desta forma que a energia, que havia sido transportada pela radiação até a base destas camadas, é finalmente transmitida para a superfície.

As estrelas da sequência principal com massas menores que a massa do Sol possuem envoltórias convectivas profundas. Por outro lado, as estrelas da sequência principal com massas maiores que $2M_\odot$ não tem envoltórias convectivas: a opacidade não é tão grande assim, e a radiação pode se difundir até a superfície da estrela. Estas estrelas contudo possuem "caroços" convectivos, isto é ,uma região em torno do seu centro, onde ocorrem correntes de convecção. Nessas estrelas a energia nuclear é produzida numa região central muito pequena, de modo que o fluxo de energia aí é muito grande e a radiação, sozinha, não consegue dar conta do seu transporte: por isso é que ali se estabelecem movimentos convectivos no gás.

A música das estrelas rivaliza com a das baleias. O seu interior é uma sinfonia de sons, reverberando fragores e trovões e sibilando agudos lamentos. Ninguém disse para a estrela qual o tamanho e forma que deveria ter, qual deveria ser a sua temperatura, quanto deveria brilhar, ou como ela poderia compensar a energia que escapa continuamente da sua superfície. São as ondas acústicas que, percorrendo a estrela em aproximadamente 1 hora, fazem com que as várias partes da estrela se comuniquem umas com as outras, permitindo que ela encontre, a todo momento, o estado de equilíbrio mais apropriado e natural. A estrela se reajusta vibrando em vários modos de

[11] O gás interior das estrelas é tão quente que seus átomos encontram-se *ionizados*, isto é, os seus elétrons encontram-se separados – livres – dos respectivos núcleos.

baixa frequência. Na outra ponta da escala sonora, umas 60 oitavas acima, o sibilar das partículas de alta velocidade, se encontrando e empurrando umas às outras, produzem ondas que atravessam apenas pequenas distâncias. Não bastasse essa imensa orquestração de sons, a estrela também funciona como um enorme alto-falante. Como a densidade de matéria decresce do centro para fora, as ondas sonoras, à medida que se propagam, aumentam de amplitude e, portanto, de intensidade. Desta forma, chega à superfície da estrela uma torrente de ondas sonoras amplificadas que, passando através dela, acaba se dissipando nas camadas atmosféricas da estrela. No caso do Sol, que tem a sua envoltória convectiva como fonte de ondas sonoras, o contínuo bombeamento de energia através de ondas acústicas ajuda a manter a *coroa* a temperaturas da ordem um milhão de graus Kelvin. A *coroa solar*, normalmente vista durante os eclipses, é a camada mais alta da atmosfera da Sol: ela é tão rarefeita que é incapaz de se livrar de toda a energia que recebe na forma de radiação. Então, sua única saída é expandir-se e expulsar o excesso de energia. Desta maneira a alta atmosfera do Sol parece com um gigantesco motor a jato: o seu combustível é o gás das camadas inferiores que, aquecido pelas ondas acústicas, é expulso em alta velocidade. Este fluxo de matéria em expansão para fora do Sol é o chamado *vento solar*, capaz de retirar do Sol algo como 100 toneladas de massa por segundo. Este fenômeno não é exclusivo do Sol: outras estrelas também têm seus *ventos estelares*, algumas vezes muito mais intensos que os do Sol – tão mais intensos que podemos dizer que algumas estrelas estão literalmente desaparecendo, evaporando-se em escalas de tempo de não mais que alguns milhões de anos.

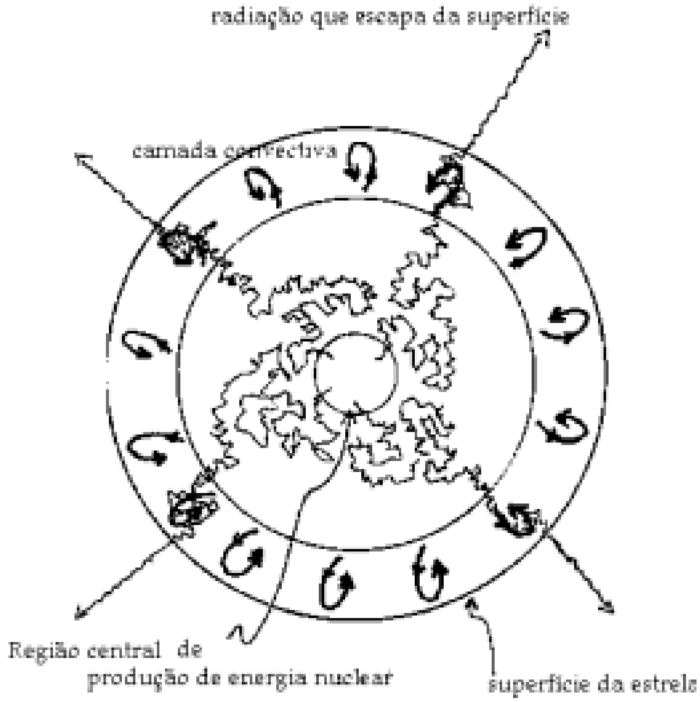


FIGURA 5.3 - ESTA FIGURA ILUSTRA COMO OS FÓTONS DE RADIAÇÃO SE DIFUNDEM ATRAVÉS DE UMA ESTRELA COMO O SOL. NO CASO DO SOL, O TEMPO QUE A RADIAÇÃO LEVA PARA SE DIFUNDIR DESDE O CENTRO ATÉ A BASE DA ENVOLTÓRIA CONVECTIVA É DA ORDEM DE 10 MILHÕES DE ANOS. QUER DIZER, SE POR ACASO A PRODUÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NO SOL CESSASSE ABRUPTAMENTE, NÓS SÓ PERCEBERÍAMOS QUE ALGO DE IMPORTANTE ACONTECEU, 10 MILHÕES DE ANOS DEPOIS !

5.4 A GERAÇÃO DE ENERGIA NUCLEAR NAS ESTRELAS

As estrelas são imensos reatores atômicos que geram energia nuclear. A luz do Sol que nos alimenta é produzida no interior profundo do Sol. Para entender isto vamos precisar nos deter um pouco e examinar como a energia nuclear é gerada nas estrelas.

5.4.1 OS NÚCLEOS ATÔMICOS

Os átomos se combinam entre si para formar as moléculas. As moléculas se mantêm coesas, graças às *forças elétricas* que resultam dos átomos que as compõem, ao compartilharem ou trocarem os seus elétrons mais externos. Estas forças elétricas moleculares não são muito fortes, quando comparadas com as forças nucleares. Assim, se fizermos um rearranjo dos átomos numa molécula, ou se a quebrarmos, o resultado será uma liberação relativamente pequena de energia *química*. A energia química é a forma de energia mais utilizada pela humanidade, por exemplo queimando petróleo ou carvão.

Todos os átomos têm um pequeno núcleo, que é carregado positivamente, rodeado por uma nuvem comparativamente grande de elétrons. O núcleo propriamente é constituído por partículas conhecidas por *núcleons*, que tanto podem ser prótons, que são carregados positivamente, ou neutrons, que não têm carga elétrica. Estes núcleons são mantidos coesos no núcleo, graças a uma outra força, que só ocorre entre núcleons, denominada força ou *interação forte* que é, comparativamente, muito mais forte do que as forças elétricas. Além disso, quando promovemos um rearranjo ou a quebra de um núcleo, podemos, dependendo do núcleo, ter uma liberação ou uma absorção de energia *nuclear*, que é, em geral, milhões de vezes maior que a energia química ordinária.

Imaginemos que dispomos de um reservatório de núcleons livres – prótons e neutrons - os quais possamos combinar e juntar de diferentes maneiras, de modo a produzir os elementos químicos da tabela periódica [12]. Sempre que um núcleo atômico, qualquer que seja, for construído a partir dos seus núcleons individuais, ocorre uma *liberação* de energia. Isto ocorre porque os núcleons sempre se atraem entre si, através da força forte. A energia que é liberada na formação do núcleo a partir dos seus componentes individuais é chamada de *energia de ligação* do núcleo.

Todas as coisas são coesas por algum tipo de energia de ligação de algum tipo. Por exemplo, uma pedra está presa à Terra através da força de gravidade: a sua energia de ligação (à Terra) é a quantidade de energia que seria liberada se a mesma pedra caísse na

---

[12] Aliás, este era o sonho dos alquimistas da Idade Média.

Terra, vinda do espaço. Neste caso, a força de atração é a força gravitacional. No caso das moléculas, a força atrativa é a força elétrica. Por outro lado, se quisermos "desmontar" um objeto nos seus componentes individuais, iremos precisar *gastar* energia, numa quantidade exatamente igual à sua energia de ligação.

Será mais conveniente agora pensarmos na *energia de ligação por núcleon*, que é calculada simplesmente dividindo a energia de ligação total do núcleo pelo número de núcleons que ele dispõe. A Figura 5.4 mostra como varia a energia de ligação por núcleon dos elementos químicos, em função do seu *número de massa*, que é igual ao seu número total de núcleons (simbolizado por A). Como se pode ver, ela primeiro aumenta até atingir o valor máximo, quando A = 56, o que corresponde ao núcleo do Ferro, e depois diminui para os núcleos mais pesados, de número de massa maior.

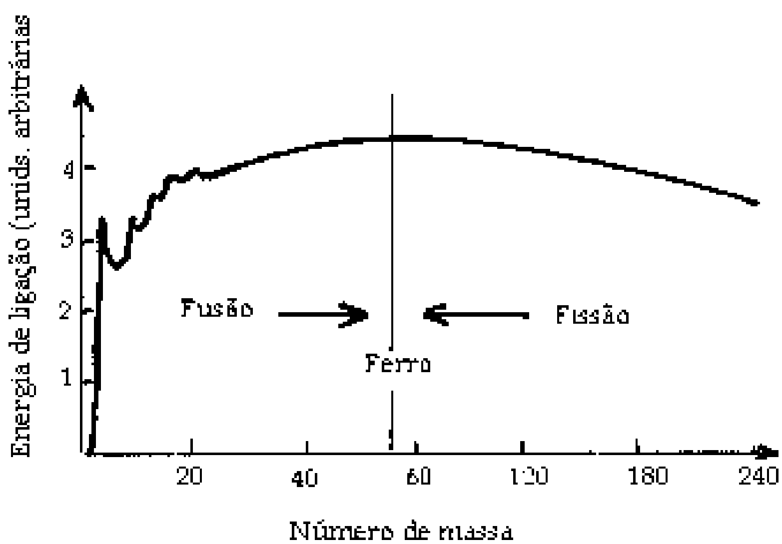


FIGURA 5.4 - A CURVA DA ENERGIA DE LIGAÇÃO DOS DIFERENTES NÚCLEOS ATÔMICOS. A ENERGIA DE LIGAÇÃO MÁXIMA, POR NÚCLEON, OCORRE PARA NÚCLEOS NA REGIÃO DO NÚCLEO DO FERRO (A = 56).

Assim, se dispusermos de 224 núcleons livres, então teremos mais energia liberada construindo 4 núcleons de Ferro do que construindo um único núcleo do elemento químico Rádio, de número de massa A=224.

5.4.2 FUSÃO OU FISSÃO ?

Na verdade, é praticamente impossível dispor de núcleons livres como nas experiências imaginárias que fizemos na seção anterior. Os prótons são fáceis de encontrar, pois eles são os núcleos dos átomos de Hidrogênio, o elemento mais abundante do Universo. Mas os neutrons são muitíssimo raros: quando ficam livres eles *decaem*, isto é, transformam-se em outras partículas, muito rapidamente. Assim, se realmente quisermos brincar de alquimistas precisaremos utilizar os núcleos já existentes e a partir deles construir os outros. Podemos juntá-los, e então teremos um processo de *fusão nuclear*, ou quebrá-los em núcleos menores, no processo de *fissão nuclear*. No entanto, embora o objetivo dos alquimistas fosse a transmutação dos elementos, o objetivo da estrela é obter energia nuclear suficiente para compensar as suas perdas. Isto só pode ser realizado quando o núcleo final tem energia de ligação *maior* que os núcleos iniciais. Olhando para a Figura 5.4, vemos que para aumentar a energia de ligação é necessário sempre caminhar em direção ao pico do Ferro. Assim, se estivermos à esquerda, isto é, se dispusermos unicamente de núcleos de elementos mais leves que o Ferro, obteremos energia pela fusão de núcleos leves em núcleos mais pesados: é assim que as estrelas obtém sua energia nuclear. Por outro lado, se estivermos à direita, teremos energia pela fissão de núcleos pesados em núcleos mais leves: esta é a maneira pela qual a Humanidade obtém energia nos reatores nucleares.

As estrelas da sequência principal obtêm sua energia pela fusão de 4 núcleos de Hidrogênio, isto é, 4 prótons, formando 1 núcleo de Hélio. Todavia, a massa de 1 núcleo de Hélio é cerca de 1% menor que a soma das massas de 4 prótons! Isto acontece porque a energia e a massa são equivalentes, de modo que a energia liberada no processo de fusão eqüivale a uma perda de massa, a qual é igual a uma pequena fração da massa original dos 4 prótons. Na verdade, qualquer forma de energia eqüivale a uma massa: por exemplo, uma chaleira de água quando aquecida até o ponto de ebulição pesa um bilionésimo de grama a mais do que quando a água está fria, porque o calor é uma forma

de energia e portanto tem massa[13]. Segundo a famosa fórmula de Einstein, a equivalência da energia com a massa se expressa assim:

$$Energia = Massa \times c^2$$

onde *c* simboliza a velocidade da luz. Assim, poderíamos, em principio, transformar 1 tonelada de matéria em energia: isto supriria a humanidade de energia por pelo menos 1 ano... O Sol produz energia consumindo sua massa a uma taxa de 4 milhões de toneladas por segundo.

As estrelas da sequência principal produzem sua energia pela queima do Hidrogênio e a sua lenta transmutação em Hélio. A energia é produzida na região central da estrela, onde a temperatura e a densidade são mais altas, e então lentamente é transportada para a sua superfície. Isto no leva à seguinte questão: Por que a energia é liberada tão lentamente ? Por que as estrelas não explodem, liberando instantaneamente uma imensa quantidade de energia nuclear ?

5.4.3 O EFEITO TÚNEL

Há dois fatores que impedem que as reações de fusão dos prótons sejam mais rápidas. Uma delas é a chamada *barreira coulombiana*, que acontece porque os prótons têm carga de mesmo sinal e, portanto, se repelem. A repulsão elétrica age como uma barreira, que é por isso adjetivada como "coulombiana"[14]. Quando dois prótons entram em colisão direta, a distância mínima que atingem antes de se repelirem depende da velocidade que tinham: quanto mais rápidos mais próximo irão estar antes de começarem a se afastar devido à repulsão elétrica. Para atingir a distância mínima necessária para iniciar a reação de fusão, os prótons necessitariam ter velocidades da ordem de 10.000 km/s. No entanto, a velocidade média dos prótons no centro do Sol é de apenas 500km/s e, na verdade, em todo o Sol não devemos encontrar nenhum próton com velocidade tão alta! Como, então, é possível que os lentos prótons solares ultrapassem a barreira coulombiana ? Isto acontece graças a um fenômeno denominado

---

[13] Se você decidir fazer esta medida, não esqueça de fechar hermeticamente a sua chaleira: qualquer molécula de vapor d'água que escapar irá falsear o resultado !

[14] O nome vem da lei de Coulomb, que dá a força de atração ou repulsão que ocorre entre as cargas elétricas.

efeito túnel, pelo qual existe efetivamente a possibilidade de que um próton atravesse "incólume" uma barreira coulombiana, não importando qual velocidade tenha. A probabilidade que isto ocorra – cujo valor depende da velocidade do próton - pode ser calculada a partir das regras da *Mecânica Quântica*, a única teoria física capaz de descrever corretamente o mundo das partículas atômicas e subatômicas. No centro do Sol, levando em conta que a velocidade média dos prótons é de 500km/s e que existem prótons com velocidades maiores e menores que a média, a probabilidade de penetração da barreira coulombiana é de aproximadamente 10^{-9}, quer dizer, uma chance de penetração, por efeito túnel, em 1 trilhão (10^9) de colisões diretas entre dois prótons. Considerando que no centro do Sol devem ocorrer aproximadamente 10^9 colisões diretas por segundo, então vê-se que, em média, a cada segundo 1 próton é capaz de penetrar a barreira coulombiana e encontrar-se face a face com outro próton. Mas isso não é tudo.

5.4.4 INTERAÇÕES FRACAS

Existe um segundo obstáculo para a ocorrência da fusão do Hélio: é o fato de que neutrons livres são raríssimos na natureza. Aonde obtê-los ? Na verdade podemos obtê-los fazendo uso da 4ª força da natureza, a chamada *interação fraca.* Através dela pode-se obter a transmutação de um próton num neutron, o que sempre acontece com a emissão de um *pósitron* (que é um elétron de carga positiva e é a antipartícula do elétron normal, negativo) e de uma outra partícula chamada *neutrino*, que tem massa nula e viaja à velocidade da luz [15] Este processo de transmutação de prótons chama-se *decaimento beta.* O problema é que o decaimento beta é um processo muitíssimo lento. É tão lento que, em média, apenas 1 vez a cada 10 bilhões de anos iremos ver dois prótons se encontrando cara a cara e reagindo violentamente e liberando energia a medida que um deles se transforma num neutron e ambos se transformam num núcleo de *deutério*, o Hidrogênio pesado. Mas, uma vez formado o deutério, todo o resto se passa rapidamente. Logo o deutério se combina com outro próton, formando o núcleo de Hélio-3 (2 prótons e 1 neutron) e liberando ainda mais energia. Os núcleos de Hélio-3

---

[15] Acredita-se que a massa do neutrino seja nula, mas seu valor real ainda não é bem conhecido.

então combinam-se rapidamente entre si para formar um núcleo de Hélio-4, o núcleo dos átomos de Hélio normalmente encontrados.

Esta sucessão de reações, nas quais 4 prótons se combinam para formar um núcleo de Hélio-4, é conhecida como *queima do hidrogênio* ou *ciclo p-p*. e pode ser esquematizada como abaixo:

próton + próton => D + e^+ + neutrino

H^2 + próton => He^3

He^3 + He^3 => He^4 + próton + próton

Onde D (ou H^2) representa o núcleo de Deutério; He^3 , o de Hélio-3; He^4, o de Hélio-4 e e^+ , o *pósitron*[16]

5.5 O NASCIMENTO DAS ESTRELAS

5.5.1 AS NUVENS INTERESTELARES: BERÇÁRIO DAS ESTRELAS

A maioria das estrelas da nossa Galáxia foram formadas há muito tempo. Apesar disso muitas estrelas são ainda jovens e novas estrelas também estão se formando, como podemos observar na nebulosa de Orion, por exemplo. As novas estrelas nascem nas grandes nuvens de gás e poeira - nuvens escuras - que se espalham pelo meio interestelar. Estas nuvens são formadas por mais de 80% de Hidrogênio (na forma molecular, H_2), uns 18% de Hélio e umas "pitadinhas" - 1% a 2% - de elementos mais pesados.

Estas nuvens, também chamadas *nuvens moleculares*, são imensas: várias centenas de parsecs, chegando a mil anos-luz. Elas contém grande quantidade de massa, de centenas a milhares de vezes a massa do Sol. Algo como 10% de toda a massa da nossa Galáxia está na forma de nuvens moleculares: uma massa equivalente a 10 bilhões de sóis. Se todas elas fossem convertidas em estrelas, a nossa Galáxia seria provavelmente uma das

---

[16] uma partícula "inimiga" do nosso familiar elétron, o e^- : quando os dois se encontram eles se auto-aniquilam, produzindo radiação eletromagnética - radiação γ

mais brilhantes (e nós, na Terra, morreríamos torrados com a imensa radiação proveniente das estrelas...

Felizmente, em condições normais, as nuvens moleculares não são muito produtivas. A maioria delas passa milhares de anos sem atividade alguma. Na Galáxia inteira nascem menos de uma dezena de estrelas por ano!

A maioria das estrelas jovens da Galáxia encontram-se próximas de seus locais de nascimento e ainda estão envolvidas pelos restos das nuvens que lhes deram origem. Muitas vezes vemos centenas de jovens estrelas reunidas em aglomerações, chamadas de *associações O,B*[17] . Um exemplo são as Plêiades, mostrada na Figura 5.5 abaixo (As Plêiades são também conhecidas entre nós como os 7 “estrelos” ou cyiuce, em língua tupi). Em casos como este, fica claro que as estrelas nasceram mais ou menos ao mesmo tempo, de uma mesma nuvem interestelar.



FIGURA 5.5 - AS ESTRELAS DAS PLÊIADES NASCERAM APROXIMADAMENTE HÁ 60 MILHÕES DE ANOS ATRÁS E AINDA ESTÃO “VESTIDAS” COM OS RESTOS DE SUA NUVEM-MÃE.

[17] As estrelas jovens de massas muito maiores que o Sol são sempre quentes; estão situadas na parte superior do ramo da sequência principal do diagrama HR. Os astrônomos classificam as estrelas mais quentes como *tipo O*, em seguida vem as do *tipo B*. Na sequência de temperaturas temos os tipos *A, F, G, K* e *M.* O Sol, pela sua temperatura, é uma estrela tipo G . Confira isto na figura do diagrama HR apresentada antes.

5.5.2 POR QUE NASCEM AS ESTRELAS ?

As grandes nuvens moleculares geram estrelas no seu interior por causa de um fenômeno conhecido como *instabilidade gravitacional*. Num certo sentido, a instabilidade gravitacional pode ser entendida como o inverso do equilíbrio hidrostático que prevalece nas estrelas. Naquele caso, como vimos, o peso de uma camada é equilibrado pela diferença das pressões nos dois lados da camada. Se, por alguma razão, o peso da camada superar a diferença de pressões, teremos o inicio de um movimento de contração que pode se transformar num colapso, isto é, todas as camadas se precipitam em direção a um centro ao mesmo tempo. Forma-se um coágulo de gás mais denso e quente no interior da nuvem: é a *proto-estrela*. À medida que a contração se desenvolve, a temperatura interna do coágulo aumenta até que, em algum momento, as condições de densidade e temperatura tornam-se favoráveis ao início da fusão do Hélio e a consequente produção de energia nuclear. Assim nascem as estrelas. As grandes nuvens interestelares são muito frias, algo como 10 ^{o}K a 100 ^{o}K , isto é, menos que -200 ^{o}C ! Por outro lado elas são também muito pouco densas: menos que 10^{-22} gramas/cm^3, correspondente a algumas dezenas de átomos por cm^3. Sendo assim tão pouco densas, elas facilmente encontram o equilíbrio hidrostático, apesar das baixíssimas pressões internas Na verdade, não é raro encontrarmos nuvens moleculares em <u>expansão</u>: quer dizer, suas pressões internas são <u>maiores</u> que as forças de gravitação [18] !

Como podemos ver, a situação das nuvens moleculares não é em nada propícia à geração de estrelas no seu interior. Isto talvez explique a sua baixa produtividade. Como, então, nascem as estrelas ? Ocorre que as nuvens sofrem também a ação de outros fatores, externos e internos a elas, capazes de comprimi-las localmente, aumentando a densidade local e assim provocando instabilidades gravitacionais locais. O principal fator externo são os braços espirais da Galáxia, que é o fator mais importante, pois é ele que dá início ao processo; o principal fator interno são as explosões das estrelas mais jovens e maior massa (estas estrelas em explosão são as chamadas estrelas *Supernovas*), formadas no interior da própria nuvem e que fazem com

que o processo de formação estelar se propague por toda a nuvem, como um incêndio numa floresta seca.

5.5.3 A VIDA DAS PROTO-ESTRELAS

Assim, por causa da instabilidade gravitacional induzida por causas externas ou internas, a nuvem entra num processo de coagulação generalizado - é a *fragmentação* da nuvem. Como a nuvem normalmente tem movimentos internos - uma *turbulência* interna- os coágulos, além da contração, apresentam também um movimento de rotação. No início, os coágulos são mais ou menos esféricos. Mas, à medida que se contraem, passam a girar cada vez mais rapidamente e, então, lentamente começam a se achatar, tornando-se oblatos. A região central, que tem que suportar o peso de todo o resto do coágulo, acaba se contraindo mais rapidamente, tornando-se mais densa e quente: é o *caroço* do coágulo.

Nas regiões externas ao caroço, que vão se tornando progressivamente mais achatadas por causa da rotação, o gás mantém-se moderadamente frio. Nesta região parte dos elementos mais pesados que o Hidrogênio e o Hélio começam a se combinar, formando microscópicos grãos de poeira. Estes, à medida que colidem uns com os outros, acabam se aglutinando em pequenas pedrinhas de rocha meteorítica e gelo que mais tarde darão origem a meteoróides e planetézimos e, mais adiante, formarão os planetas. Tal deve ter sido o processo de formação do nosso Sistema Solar e assim deve ocorrer na maioria das estrelas.

Enquanto isso, o caroço do nosso coágulo continua seu processo de contração, tornando-se denso e quente e se aproximando do estágio final. É a estrela primitiva, ainda envolta por uma grande quantidade de gás e poeira. Neste momento ela descobre que queimando o Hidrogênio em Hélio terá acesso a um imenso reservatório de energia. A estrela entra então num estado convulsivo, à procura da melhor estrutura interna de equilíbrio capaz de ajustar a sua taxa de produção de energia à energia que expulsa pela

---

[18] Para se ter uma idéia do quão rarefeitas são estas nuvens, a densidade de partículas na atmosfera terrestre, a uma altura de 50km, é algo em torno de 10^{16} átomos por cm^3 , 100 trilhões de vezes superior! Como elas são tão rarefeitas, sua opacidade é praticamente nula (mas, então, por que são escuras ?)

sua superfície na forma de radiação: ela torna-se uma estrela variável irregular do *tipo T-Tauri* [19]. Neste estado convulsivo, com profundas zonas de convecção desde a superfície, a estrela primitiva passa a produzir um intenso vento estelar que, ao final, acaba por varrer de volta para o meio interestelar todo o material que a envolvia (e possivelmente boa parte da atmosfera dos planetas mais próximos dela...).

Quando, finalmente, encontra a sua melhor estrutura interna a estrela entra num estado quiescente de queima do Hidrogênio em Hélio, o qual pode durar bilhões de anos: agora ela é uma estrela da sequência principal.

5.6 VIDA E MORTE DAS ESTRELAS

5.6.1 A ESTRELA ESGOTA O SEU RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO

O que irá acontecer com uma estrela da sequência principal após esgotarem todo o seu Hidrogênio central, dependerá da massa que ela que ela tiver. De maneira geral, as estrelas evoluem tanto mais rapidamente quanto maior for a sua massa. As estrelas de massa menor que o Sol, levam muito tempo para fazer isto, mais do que os 10 bilhões de anos, que é a idade da Galáxia. Sobre estas estrelas, só podemos tentar predizer o seu futuro, já que todas elas, mesmo as que nasceram nos primórdios da vida da Galáxia, ainda se mantém na sequência principal. As estrelas de massa maior que o Sol, no entanto, evoluem mais rapidamente.

Depois que a estrela consome todo o seu suprimento de Hidrogênio central, ela deixa a sequência principal e começa a se mover, no diagrama HR, em direção à região das estrelas *gigantes vermelhas*. A região central agora é constituída quase que inteiramente de Hélio e não produz mais energia alguma. No entanto a estrela continua irradiando energia pela sua superfície. A maior parte desta energia está acumulada na região central, o *caroço* da estrela. Ele perde energia, esfria-se e começa a se contrair,

---

[19] A estrela T Tauri, da constelação do Touro, é uma estrela de variabilidade irregular que está envolta numa densa nuvem de gás e poeira. Acredita-se que seja uma estrela jovem, que está ingressando da sequência principal. Estrelas em estágio semelhantes são, por extensão, nomeadas como sendo *do tipo* T-Tauri

aumentando a sua temperatura e densidade e liberando energia gravitacional[20], parte da qual irá se converter em calor no resto da estrela. Duas coisas então vão acontecer.

Primeiro, o Hidrogênio que está logo acima do caroço central de Hélio vai começar a queimar. Forma-se uma camada de queima de Hidrogênio e esta queima irá progressivamente aumentar o tamanho e a massa do caroço de Hélio. Segundo, a outra parte da energia gravitacional liberada, além da energia nuclear produzida na camada de queima do Hidrogênio, irá aquecer as partes externas da estrela - a sua *envoltória* - a qual começará a se expandir. A estrela aumenta o seu brilho e se torna, de fato, uma gigante vermelha.

5.6.2 A VELHICE

A partir do momento que a estrela deixa a sequência principal, é sinal que ela está entrando na sua "3ª idade" . Ela tem, comparativamente, pouco tempo de vida. Ela percebe, tardiamente, que a vida na sequência principal era por demais calma e sedentária e decide que terá, ao menos, um final glorioso . Infelizmente, não lhe resta muito combustível nuclear. Agora tudo que pode fazer é tentar queimar o Hélio que ainda lhe sobrou, e proceder a fusão paulatina de todos os elementos, passo a passo, até o Níquel e o Ferro. A cada passo, maiores densidades e temperaturas centrais são requeridas e o restante do combustível nuclear é queimado de forma cada vez mais rápida.

5.6.3 GIGANTES VERMELHAS E ANÃS BRANCAS

Vamos começar considerando as estrelas de massa <u>menor que 2 massas solares</u>. Elas terminam sua vida como anãs brancas. Durante sua fase gigante vermelha, estas estrelas continuam a contrair o seu caroço central até que a sua temperatura e densidade sejam suficientemente altas para iniciar a queima do Hélio em Carbono. Enquanto isto não

---

[20] Como liberar energia gravitacional ? Um experimento simples: amarre uma corda num peso e deixe-o pendurado entre os dedos da sua mão. Agora afrouxe as mãos, deixando o peso cair de forma que a corda deslize entre os seus dedos. Eles vão esquentar: este calor produzido é resultado da conversão da energia gravitacional liberada ao cair o peso (cuidado para não se queimar !!!).

acontece, a gigante vermelha continua a aumentar o seu brilho. No diagrama HR ela segue uma trajetória praticamente vertical. A ignição do Hélio ocorre quando a temperatura central chega aos 100 milhões de graus (10^8 °K). Ela acontece de repente: é o chamado *flash do Hélio*. O caroço central se expande subitamente e a luminosidade da estrela diminui até se estabilizar várias ordem de grandeza abaixo, enquanto o Hélio passa a ser queimado de maneira quiescente.

Nesta fase, ou mesmo antes do flash do Hélio, as estrelas produzem ventos intensos e perdem boa parte de suas envoltórias, deixando expostos seus caroços brilhantes. Quando o Hélio central é esgotado acaba a produção de energia nuclear e o caroço se contrai até se tornar uma anã branca. Neste ponto a estrela é constituída por uma envoltória de material ejetado, chamada *nebulosa planetária* e, mais ou menos no centro da nebulosa, uma estrela anã branca, de tamanho comparável ao da Terra, esfriando lentamente (cf. Figura 5.6).



FIGURA 5.6 - NEBULOSA PLANETÁRIA. ESTA É A NEBULOSA DA HÉLICE, A MAIS PRÓXIMA DE TODAS AS NEBULOSAS PLANETARIAS (450 ANOS-LUZ). A PEQUENA ESTRELA CENTRAL É O CAROÇO BRILHANTE DA ESTRELA CUJA ENVOLTÓRIA, HOJE, CONSTITUE A NEBULOSA.

Dentro de uns 5 bilhões de anos, o nosso Sol também irá se tornar uma anã branca. Apenas uma luz pálida irá brilhar no nosso gelado planeta, por vários bilhões de anos.

5.6.4 AS SUPERNOVAS

Vamos, agora, considerar o caso das estrelas de maiores massas, situadas na parte superior da sequência principal. Elas rapidamente liquidam com o seu reservatório central de Hidrogênio e deixam a sequência principal em poucas dezenas de milhões de anos. Então, elas se tornam gigantes vermelhas monstruosamente grandes (chamadas de *Super-Gigantes* vermelhas), com o caroço de Hélio rodeado por uma camada onde queima o Hidrogênio. À medida que o caroço se contrai, o Hélio começa a queimar, transformando-se em Carbono e Oxigênio. Logo a estrela passa a ter um caroço inerte de Carbono e Oxigênio, rodeado por uma camada de queima de Hélio, que por sua vez é rodeada por uma camada de queima de Hidrogênio. Passando o estágio de gigante vermelha, a estrela torna-se ainda mais luminosa, sofrendo agora de episódios de pulsação e de ejeção de gás a altas velocidades. Neste estágio, estas estrelas são por vezes denominadas *estrelas Wolf-Rayet*.

O caroço inerte de Carbono e Oxigênio passa então a se contrair na busca de novas fontes de energia nuclear. Quando a temperatura central atinge a casa dos 3 bilhões de graus e a densidade se aproxima dos milhões de gramas/cm^3, o Carbono e o Oxigênio passam a queimar progressivamente em Neônio, Magnésio, Silício, Fósforo, Enxofre, e assim por diante, até o Níquel e o Ferro. No entanto, a energia nuclear liberada por esta multitude de reações é comparativamente pequena e é logo irradiada pela superfície da estrela.

Durante este estágio da estrela ocorrem outras perdas de energia, além daquela na forma de radiação eletromagnética. Hordas de neutrinos, produzidos nas próprias reações nucleares, e também pelo gás que se encontra a altíssimas temperaturas, propagam-se pela estrela livremente, sem nenhuma interação com a matéria. A luminosidade em neutrinos produzidos no interior do caroço aumenta tanto que chega a exceder a luminosidade da estrela na forma de radiação. Chegado este ponto, a única reserva de energia que sobra para a estrela é sua energia gravitacional. Para compensar as perdas cada vez maiores de energia, o caroço tem que contrair cada vez mais rápido. A densidade e temperaturas centrais vão aos píncaros e aí acontece o pior: o caroço começa a perder mais energia porque passa a produzir os elementos mais pesados que o

Ferro (reveja a Figura 5.4 para entender porque).

A estrela está, agora, a uns poucos segundos de sua morte. As densidades são tão altas que os neutrinos já não conseguem escapar facilmente. Eles transportam energia do caroço para a envoltória que se aquece cada vez mais, até ao ponto em que reações nucleares começam a ocorrer no próprio manto estelar. O caroço em contração livre colapsa inteiramente, provocando a fissão de todos os elementos pesados, que se desintegram de volta em núcleos de Hélio. O vento de neutrinos se intensifica e se torna uma onda de choque que varre o manto estelar, explodindo no espaço. Nos últimos momentos do caroço em implosão, os próprios núcleos de Hélio são desintegrados em prótons e neutrons: agora, toda a energia que a estrela irradiou durante os bilhões de anos que esteve na sequência principal deve ser imediatamente devolvida. O caroço encontra esta energia através de um colapso ainda mais catastrófico. Os elétrons são espremidos contra os prótons e, juntos, transmutam-se em neutrons[21]. O caroço colapsado, desvestido do seu manto explodido, emerge agora como uma *estrela de neutrons* girando rapidamente. Esta explosão titânica, causada pela energia liberada na implosão do caroço e pela explosão do manto, resulta numa *Supernova*: por um curto período de tempo ela torna-se tão brilhante quanto todas as estrelas da Galáxia brilhando juntas. Se uma Supernova ocorresse a uma distância equivalente a Alfa Centauro, ela brilharia nos céus da Terra tanto quanto o Sol.

[21] Esta reação é chamada *decaimento beta-inverso*, porque é o inverso do decaimento beta discutido anteriormente



FIGURA 5.7 - A NEBULOSA DO CARANGUEJO NA CONSTELAÇÃO DO TOURO É UMA DAS FONTES MAIS INTENSAS EM ONDAS DE RADIO E TAMBÉM EM RAIOS-X E ULTRA-VIOLETA. A SUA LUMINOSIDADE TOTAL É 100.000 VEZES MAIOR QUE A LUMINOSIDADE DO SOL. ESTE IMENSA ENERGIA DA NEBULOSA VEM DO PULSAR QUE SE ENCONTRA NO SEU CENTRO. ESTA NEBULOSA É O RESTO DE UMA SUPERNOVA QUE EXPLODIU NO ANO DE 1054DC E QUE FOI REGISTRADA (A OLHO NU E DURANTE O DIA !!!) PELOS CHINESE E TAMBÉM PELOS ÍNDIOS NORTE-AMERICANOS.

5.6.5 ESTRELAS DE NEUTRONS E BURACOS NEGROS

Uma estrela de neutrons tem um raio pouco maior que 10km e densidade perto dos 1000 trilhões de gramas/cm^3. Uma gotinha de matéria neutrônica pesaria na Terra milhões de toneladas. Uma estrela de neutrons possui campos magnéticos de 10^{12} gauss - um trilhão de vezes mais intenso que o campo magnético da Terra - e começa sua vida girando rapidamente, a centenas de voltas por segundo. Ela é um *pulsar*.

Das cinzas da estrela morta uma nova estrela nasce, uma estrela que envia através do espaço uma mensagem pulsada que chega aos confins da Galáxia. Por milhões de anos, pulsando cada vez mais lentamente, o pulsar irradia a sua energia rotacional.

As estrelas de neutrons nunca têm massas maiores que 3 massas solares. Isto acontece porque a matéria neutrônica não é capaz de suportar forças gravitacionais produzidas por massas maiores que este valor. Por isso a implosão dos caroços centrais das estrelas de grande massa nem sempre resultam em estrelas de neutrons. Se sua massa for maior que este valor crítico, a implosão continua até produzir um *buraco negro*. Não iremos discutir estes objetos tão intrigantes, apenas comentar que eles possuem campos gravitacionais extremamente intensos. O espaço-tempo no seu entorno é completamente encurvado e, embora a matéria possa ser atraída por ele, dele nunca poderá escapar.

5.7 BIBLIOGRAFIA

Harrison, E.R. **Cosmology - The Science of the Universe**, Cambridge, 1981, (com o meus agradecimentos: este texto inspirou boa parte destas notas).

Hartmann, W.K. **Astronomy: The Cosmic Journey**, Wadsworth Pubblishing, 1989.

Maciel, W. J. (editor) **Astronomia e Astrofísica** (texto de curso de extensão universitária do Depto. de Astronomia do Inst. Astronômico e Geofísico - USP), 1991.

Capítulo 6

GALÁXIAS*

Carlos Alexandre Wuensche**

* Revisado em junho/2003

** e-mail: alex@das.inpe.br

GALÁXIAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

6.1. INTRODUÇÃO

Numa noite escura e longe das luzes da cidade, vemos que, independente de que região na Terra estivermos, é notável a existência de uma faixa concentrada de estrelas que cruza o céu. Essa faixa é chamada de Via Láctea: a Galáxia onde nosso Sistema Solar está localizado. A forma mais simples de perceber que a Via Láctea é uma galáxia é observar a emissão rádio ao longo do plano; a faixa de estrelas que vemos no céu é o plano da Galáxia. Veja um esboço da sua estrutura na Figura 6.1.

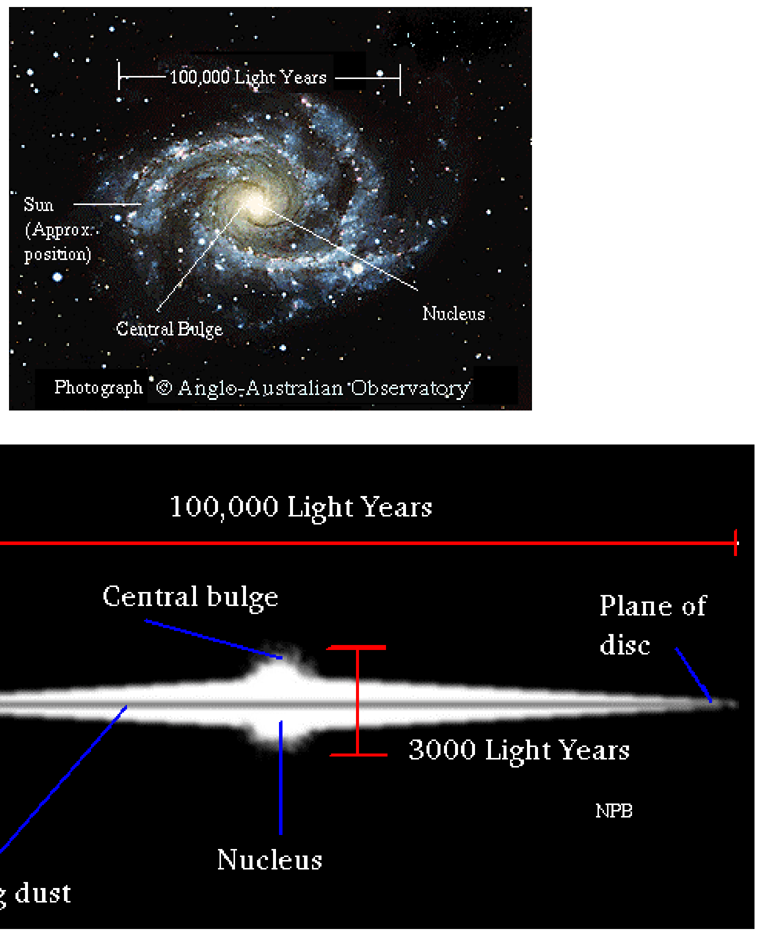


Figura 6. 1 – Vista representativa da estrutura da nossa Galáxia, com o disco representado em branco. O halo tem uma forma circular e circunda todo o disco. A distância do Sistema Solar ao centro da Galáxia está representada do lado esquerdo da figura inferior: ~ 30 mil anos luz (Ref: http://www.star.le.ac.uk/edu/mway).

Ela possui a forma de uma espiral, sobre a qual falaremos nessa seção e é constituída de um disco com um núcleo (a região do plano) e um halo com a forma aproximadamente esférica que envolve o disco.

6.2. A ESTRUTURA DA NOSSA GALÁXIA

Somente podemos ver a olho nu a faixa de estrelas que constituem o disco da Galáxia, mas existem outros dois componentes tão importantes quanto as estrelas: o gás interestelar e a poeira. Vamos então discutir qual é a forma da nossa Galáxia. Conforme mencionamos, podemos entender a forma da Galáxia se pensarmos num disco com um bojo no centro, envolvido por um halo esférico. O diâmetro desse disco, estimado através das medidas de hidrogênio através do plano, é da ordem de 100000 anos luz. A espessura do disco é muito menor, da ordem de 2000 anos luz. O nosso Sistema Solar encontra-se a cerca de 30000 anos luz do centro da Galáxia, num dos braços espirais.

Como visto no capítulo sobre as estrelas, ao observarmos as estrelas notamos que a imensa maioria delas se distribui ao longo da seqüência principal no diagrama HR. Tipicamente, as estrelas podem ser divididas em dois grupos: tipo I, que caracteriza as estrelas mais jovens e com composição química mais heterogênea (formadas de hidrogênio, hélio e uma fração de elementos mais pesados que os dois), e tipo II, as mais antigas, com composição química mais homogênea (praticamente só hidrogênio e hélio), semelhante à da nuvem-mãe que deu origem à Galáxia. As estrelas mais jovens acabam, pela estrutura dos braços espirais e gravidade local, concentrando-se em regiões próximas do plano. As estrelas mais antigas estão principalmente localizadas em aglomerados globulares, espalhados pelo halo.

Essa concentração de estrelas em aglomerados é normal e observada na nossa e em outras galáxias. Aglomerados estelares são extremamente importantes no estudo da evolução estelar e galáctica. Objetos formados em aglomerados possuem tipicamente a

mesma composição química, a mesma idade e estão situados aproximadamente à mesma distância de nós. Então, estudar as estrelas em aglomerados nos permite ver objetos em estágios evolutivos diferentes, mas que foram formados a partir das mesmas condições iniciais. Classificamos os aglomerados em abertos e globulares. Aglomerados abertos estão concentrados no disco e contém, em média, 100 objetos, quase que só do tipo I. Eles são um grupo esparso, cujas componentes estão ligeiramente ligadas pela gravidade. Exemplos clássicos de aglomerados abertos são as Plêiades (Figura 6.2) e as Híades (na constelação de Touro).



Figura 6.2 – M45, um dos mais brilhantes e próximos aglomerados abertos conhecido. Também conhecido como Plêiades, ele contém cerca de 3000 estrelas e encontra-se a ~ 400 anos-luz da Terra. (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

Já os aglomerados globulares (Figura 6.3), mencionados no parágrafo anterior, são fortemente ligados pela gravidade, possuem uma forma esférica bem definida (com raio da ordem de uns 100 anos luz) e contém cerca de 100000 estrelas. A maioria das estrelas componentes são do tipo II.



Figura 6.3 – Messier 80, um dos 147 aglomerados globulares conhecidos na Galáxia, localizado a 28,000 anos-luz da Terra, M80 contem centenas de milhares de estrelas, ligadas por sua atração gravitacional mútua (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

Vamos olhar agora para os outros componentes das galáxias: as nuvens de gás e poeira. As nuvens de gás interestelar são uma espécie de resíduo do processo de formação das estrelas. Regiões espalhadas pela nuvem se condensam e dão origem às estrelas; o gás que resta após o processo de formação continua espalhado entre as estrelas e “confinado” ali pela força da gravidade. A existência de nuvens ao longo do plano da Galáxia e em seus braços é responsável pelo obscurecimento (absorção da luz emitida pelas estrelas mais distantes) ao longo do plano. Partículas de poeira cósmica são também responsáveis pelo obscurecimento ao longo do plano Galáctico na faixa óptica. O tamanho dos grãos de poeira é da ordem de alguns milésimos de milímetros e emitem principalmente radiação infravermelha. Essa emissão é uma forma de reprocessamento da luz visível, absorvida pelos grãos, utilizada para aquecê-los e depois retransmitida no infravermelho.

O astrônomo Robert Trumpler mostrou, em meados da década de 30, que poeira e gás eram responsáveis pelo obscurecimento do plano Galáctico. Vemos uma grande quantidade de estrelas espalhadas pelo plano, mas não conseguimos ver outras galáxias através dele exatamente por essa razão. Ao olhar para fora do plano, vemos menos estrelas e mais galáxias distantes. Trumpler mostrou que a luz emitida pelas estrelas é reduzida pela metade a cada 3000 anos luz percorridos ao longo do plano galáctico. Assim a radiação emitida do centro da Galáxia chega até nós (localizados a 30000 anos luz do centro) com uma intensidade $(1/2)^{10}$, ou seja, aproximadamente 0,001 vezes a intensidade inicial, devido à absorção pelas nuvens de gás e poeira. Como sabemos então que ela tem a forma de uma espiral, com braços ao redor de um núcleo? Mapeamos a estrutura de "disco + halo", mencionada no começo dessa seção, utilizando a emissão rádio e infravermelho, cujos comprimentos de onda são pouco absorvidos, para traçar o contorno da Galáxia usando medidas nos braços espirais (Figura 6.4).

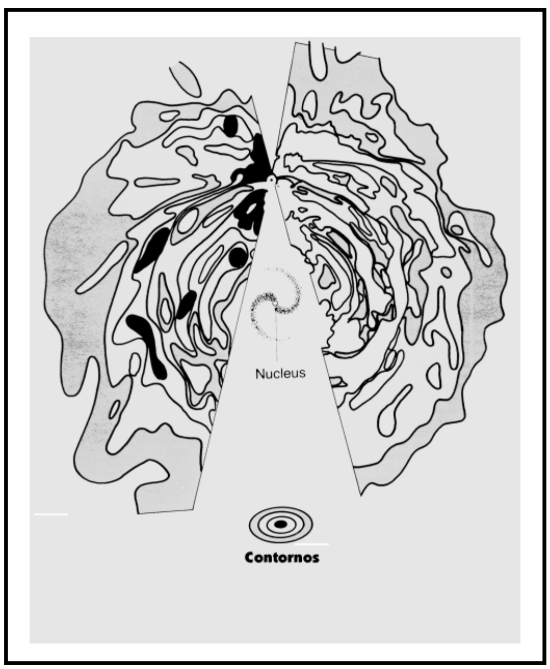


Figura 6.4 – Emissão de rádio no comprimento de onda de 21 cm, produzida por hidrogênio neutro, e usada para mapear os braços espirais da Via Láctea

A Figura 6.5 mostra um mapa de emissão sincrotron de todo o céu, com destaque para o plano da nossa Galáxia, feito na freqüência de 408 MHz. Esse mapa, feito por Haslam e colaboradores, é famoso por ter sido montado a partir da combinação de medidas em diversos telescópios ao longo de 15 anos. A maior parte da emissão concentra-se no plano da Via Láctea (que tem a forma de uma “corcova”) e um bom número de radiofontes individuais dentro e fora da Galáxia aparecem também na figura.

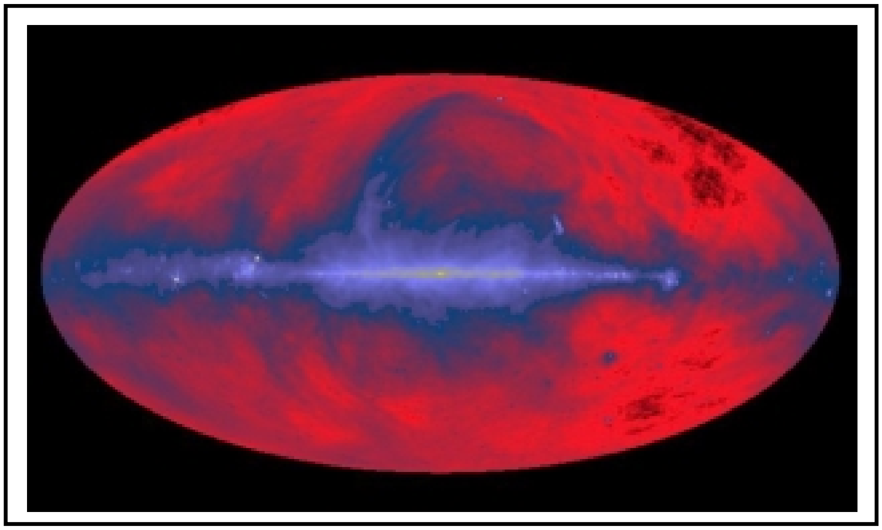


Figura 6.5 – Mapa de emissão sincrotron feito por Haslam e colaboradores. A freqüência de observação é 408 MHz e o plano da Galáxia é a faixa escura, situada no centro do mapa. Nesse mapa não se observa estrelas individuais, mas radiofontes extensas e restos de supernovas (Ref: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod).

6.3. AS FORMAS CONHECIDAS: ESPIRAIS, ELÍPTICAS E IRREGULARES

A maior parte das galáxias possui características que permitem classificá-la como espirais ou elípticas. Galáxias elípticas possuem uma aparência oval e algumas são quase esféricas. Elas apresentam núcleos brilhantes com regiões externas mais tênues e não possuem uma borda claramente definida. Tipicamente quase não contém gás ou poeira, a matéria prima que permite a formação contínua de estrelas e são formadas, em

grande maioria, por estrelas de população II (velhas).

A faixa de massa e tamanho das galáxias elípticas é grande, cobrindo desde anãs (pouco maiores que um aglomerado globular) até raras gigantes (como M87) e supergigantes, com mil vezes a massa da nossa galáxia e cerca de 500000 anos luz de diâmetro. A maioria das galáxias (mais de 60%) é elíptica, em grande parte galáxias anãs. Na classificação de galáxias, as elípticas são identificas pela letra E seguida de um número que define os diversos tipos de elípticas.

Galáxias espirais, como a nossa, têm discos com núcleos e halos difíceis de serem vistos principalmente por causa do brilho do núcleo e do disco. Como o disco e os braços espirais são constituídos de estrelas de população I, jovens, e contém bastante gás e poeira, especialmente nos braços, elas possuem uma taxa alta de formação de estrelas, que explica esse brilho. Já o halo é constituído de uma população de estrelas tipo II. Os braços espirais estão enrolados em torno do núcleo, dando não mais do que uma volta ao seu redor. As galáxias espirais formam duas seqüências separadas: as espirais barradas (Sb) e as espirais normais (S). Espirais normais são subdivididas em Sa (núcleos grandes e pequenos braços enrolados), Sb (núcleos menores e braços mais soltos) e Sc (núcleos bem pequenos e braços quase “desacoplados” do núcleo). Cerca de um terço das galáxias espirais observadas são barradas e sua subclassificação é a mesma: SBa, SBb e SBc. A razão da existência da barra ainda não é bem entendida pelos astrônomos. Seu intervalo de massa e tamanho é bem menor que o notado nas elípticas, variando entre 100 e algumas centenas de bilhões de vezes a massa do Sol.

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram fotos de galáxias elípticas e espirais. Nota-se claramente a diferença em suas estruturas. Entretanto, não se tem uma idéia clara do porquê da existência dos braços espirais, ou melhor, da forma espiral. O dilema dos braços (como se formaram? Por que não se enrolam ao redor do núcleo da galáxia?) vem sendo estudado desde o início do século e a sugestão mais aceitável, dada pelo astrônomo

sueco Bertil Lindblad e aperfeiçoada pelo matemático americano C.C. Lin, é que os braços das galáxias espirais são “cristas” de uma onda de densidade. Cada período dessa onda é da ordem de algumas dezenas de milhões de anos. Coincidentemente, esse é o tempo de vida das estrelas tipo O e B presentes nos braços das espirais.

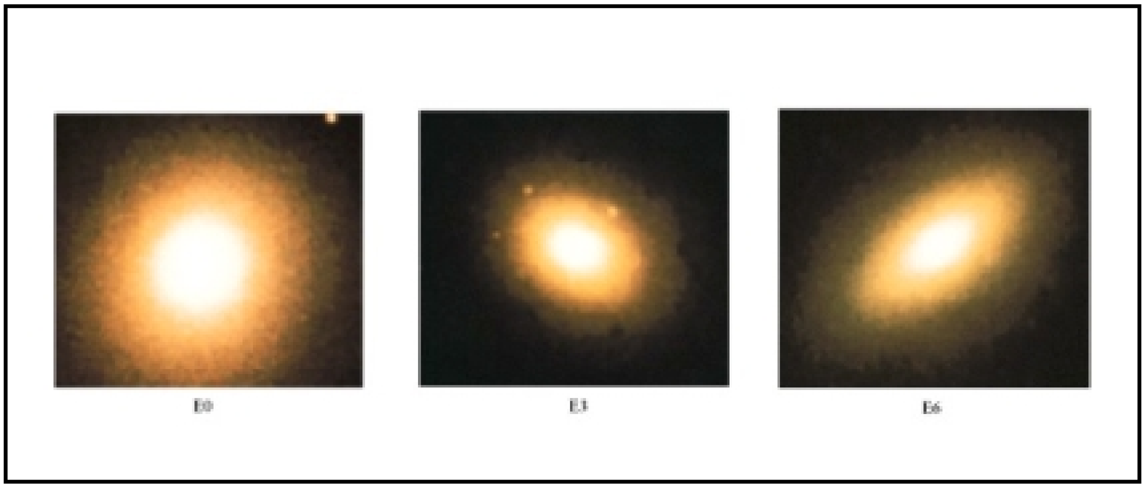


Figura 6.6 – Galáxia elíptica E0, E3 e E0. Note-se o gradual aumento de excentricidade da esquerda para a direita.



Figura 6.7 – Galáxias espirais Sa, Sb e Sc, com a clara variação na forma e estrutura dos braços. Note-se a ausência, nessa foto, de espirais com barra.

Edwin Hubble classificou os vários tipos de galáxias em um diagrama semelhante a um diapasão, onde as elípticas formam um grupo em um dos lados do diapasão e as espirais são divididas no “garfo” (Figura 6.8). A classificação é baseada na aparência das galáxias. Na junção dos três braços, Hubble colocou o tipo S0, que é bastante estranho e combina propriedades de ambos os tipos (Figura 6.9). Elas tem a forma e o disco das espirais, mas não tem gás e poeira que permitem a formação de estrelas. A velocidade de rotação e a quantidade de poeira crescem das elípticas para as espirais. Apesar dessas diferenças, não existe nenhuma evidência que um tipo de galáxia evolui para o outro. Provavelmente as características que mencionamos aqui são todas determinadas nos instantes de formação de cada uma.

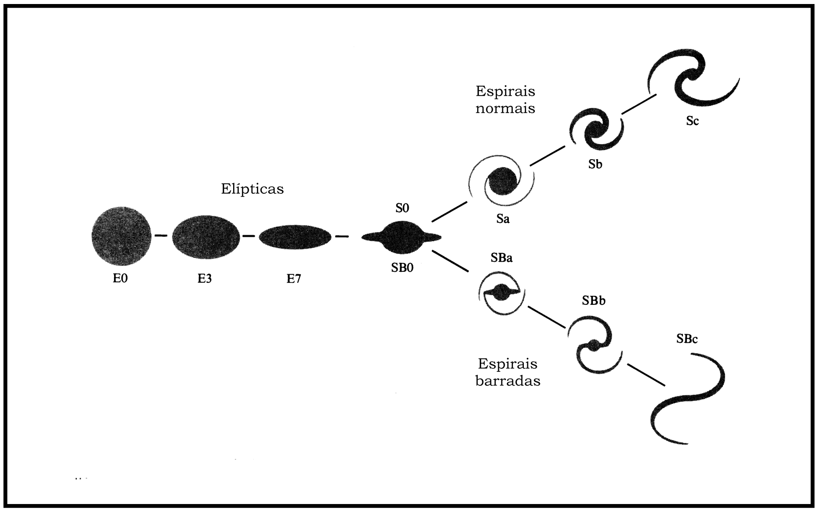


Figura 6.8 – Diagrama de Hubble para classificação de galáxias regulares (Fonte: Shu, pág. 294).

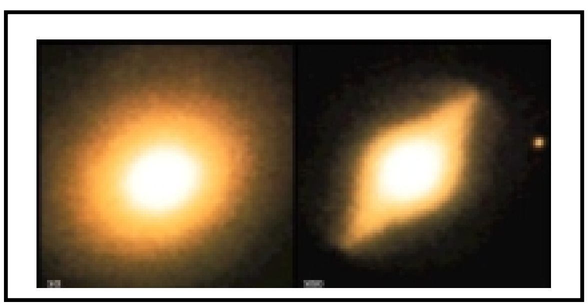


Figura 6.9 – Imagens de galáxias S0. Note a presença de uma barra no objeto à direita (Sb0).

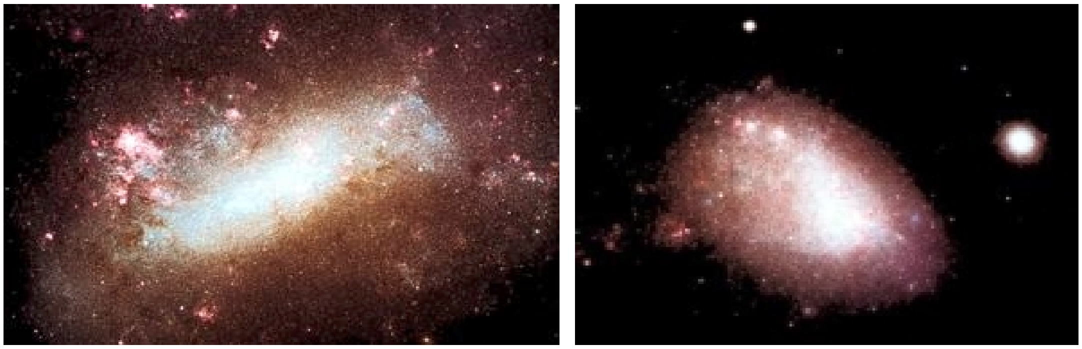


Figura 6.10 – Da esquerda para a direita, Grande Nuvem e Pequena Nuvem de Magalhães.

Uma pequena percentagem de galáxias estudadas não se encaixa nas classificações acima, sendo então denominadas irregulares (Irr). Nossas vizinhas mais próximas, a Pequena e a Grande Nuvem de Magalhães são exemplos típicos de galáxias irregulares (Figura 6.10).

Existem ainda galáxias compactas e extremamente brilhantes e densas descobertas por Fritz Zwicky e, ainda, outras que apresentam formas distorcidas e estranhas. Em alguns casos essas formas podem ser explicadas por interação com algum objeto próximo (galáxias vizinhas), mas em outros a causa da distorção é, simplesmente, desconhecida.

6.4. A FORMAÇÃO DAS GALÁXIAS

As galáxias devem ter sido criadas há bilhões de anos atrás. Tanto quanto sabemos, todas elas possuem estrelas de população tipo II, logo sua idade deve ser de, pelo menos, uns 10 a 11 bilhões de anos, que é a idade típica das estrelas de população II. O Universo hoje é muito velho para formar novas galáxias, porque o gás espalhado entre as galáxias e aglomerados possui uma densidade muito baixa para formar novas estruturas. A densidade média de uma galáxia é da ordem de um átomo por centímetro

cúbico. Essa seria a densidade se todas as estrelas fossem dissolvidas e espalhadas uniformemente pelo volume da galáxia.

Embora extremamente baixa para os nossos padrões (a densidade do nosso corpo é de 1 $g.cm^{-3}$, ou $1x10^{24}$ átomos por centímetro cúbico), essa densidade ainda é cerca de um milhão de vezes maior do que a densidade do Universo hoje (cerca de 10^{-30} $g.cm^{-3}$). Entretanto, quando o sistema solar se formou a densidade do Universo era cerca de 10 vezes maior do que a densidade de hoje. Quando o Universo tinha cerca de 10 milhões de anos, sua densidade era cerca de um milhão de vezes maior do que hoje (um átomo de hidrogênio por centímetro cúbico) e as galáxias ainda estavam em processo de formação.

Basicamente, a teoria de formação e evolução das galáxias envolve uma participação importante da força gravitacional. A teoria do colapso sugere que galáxias, da mesma forma que estrelas, formaram-se a partir de uma nuvem de hidrogênio e hélio, ambos criados nos primeiros instantes de vida do Universo (mais precisamente, nos três primeiros minutos). Inicialmente, essas nuvens se expandiam junto com a expansão do próprio universo; depois de um certo tempo, a atração gravitacional de uma região um pouco mais densa dentro da nuvem fez com que ela se expandisse mais lentamente. Finalmente, após alguns milhões de anos, ao invés de continuar a expansão, a nuvem começou a se contrair e a separação entre diferentes nuvens foi aumentando. A Figura 6.11 mostra como esse processo provavelmente ocorreu.

A maioria das galáxias aparentam ser entidades independentes, interagido umas com as outras devido à força gravitacional. Isso é uma “ilusão” causada pela impossibilidade de telescópios observarem a enorme quantidade de gás existente entre as galáxias. Uma enorme quantidade de gás parece existir em todos os aglomerados de galáxias e sua presença é notada devido à emissão de raios X, que ocorre quando o gás é acelerado pelo campo gravitacional das galáxias.

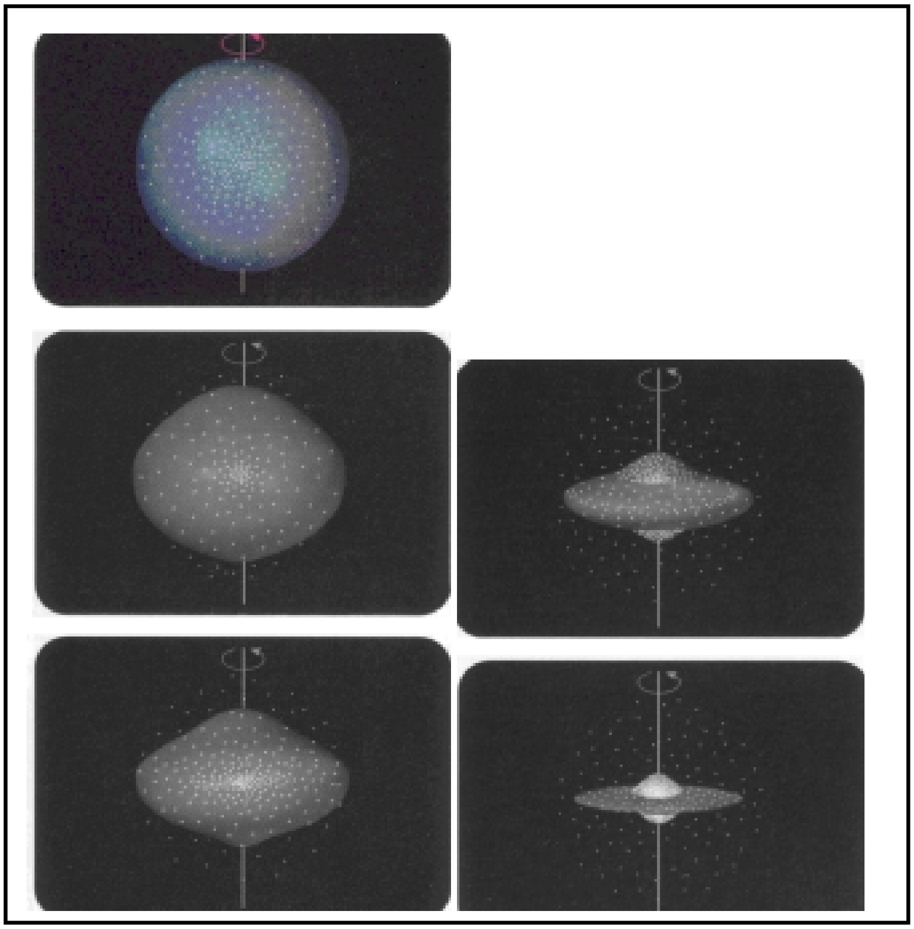


Figura 6.11 – De cima para baixo, vemos uma nuvem de gás em expansão; no centro a nuvem começa a colapsar sob o efeito da matéria concentrada no seu interior. Embaixo, estrelas de população II são formadas no núcleo. As regiões externas do globo caem para o centro e criam um disco de gás em rotação onde estrelas de população I irão, futuramente, se formar (Ref. Adaptada de Seeds, 2000)

Durante o processo evolutivo, colisões dos mais diversos tipos devem acontecer entre galáxias, algumas bastante dramáticas, especialmente quando galáxias espirais estão envolvidas. Grupos e aglomerados certamente são afetados pela força gravitacional dos outros componentes e, muitas vezes, ocorre a fusão de duas galáxias para formar uma galáxia gigante ou, quando o evento é muito violento, uma onda de choque pode romper a estrutura estável e destruir as galáxias envolvidas na colisão.

6.5. RADIOGALÁXIAS E QUASARES

O início da observação do Universo na faixa de rádio do espectro eletromagnético ocorreu na década de 30 com Karl Jansky e Grote Reber. A partir do final da II Guerra Mundial, radiotelescópios começaram a ser construídos na Inglaterra e Austrália e hoje, grande parte da pesquisa feita sobre o Universo distante é possível porque a emissão em rádio é capaz de viajar grandes distâncias sem sofrer nenhum tipo de absorção no meio intergaláctico.

Centenas de radiofontes foram descobertas nos últimos 50 anos e a grande maioria delas foi associada a um objeto também visível no óptico. Assim, Taurus A (a fonte mais intensa observada na constelação de Touro) foi associada à nebulosa do Caranguejo, uma nuvem de gás produzida por uma explosão de supernova em 1054 DC. Cignus A (ou 3C 405) foi identificada com uma galáxia gigante a cerca de UM BILHÃO de anos luz. A maior parte das fontes de rádio muito intensas também visíveis no óptico são galáxias e emitem milhões de vezes mais energia em rádio que a nossa galáxia. Elas emitem mais energia em rádio do que na faixa visível e, normalmente, são galáxias elípticas gigantes, em geral os objetos mais brilhantes dos aglomerados de galáxias. O mecanismo responsável por essa enorme geração de energia é chamado de ***emissão sincrotron***. As ondas de rádio são emitidas por elétrons livres que se movem numa trajetória espiral em torno de campos magnéticos nessas radiofontes (Figura 6.12). Os

elétrons possuem energias muito grandes, mas, paradoxalmente, os campos magnéticos que os aprisionam são muito mais fracos que o campo magnético terrestre.

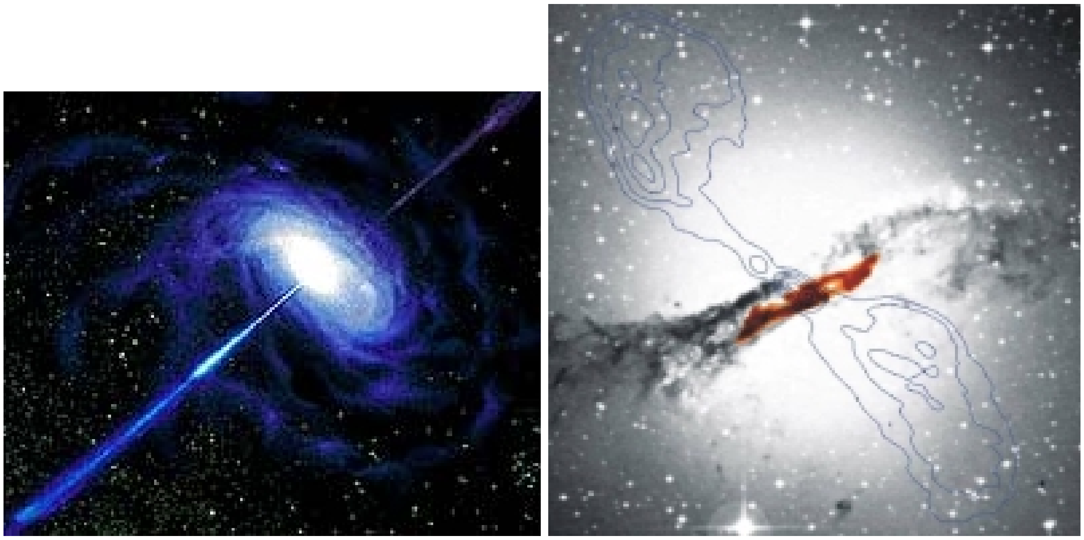


Figura 6.12 – Representação de um núcleo ativo de galáxia (AGN). O feixe perpendicular (acima e abaixo) ao disco são emissões de alta intensidade, causadas provavelmente pela aceleração de partículas pelo campo magnético do AGN. O objeto à direita é Centaurus A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo. Cen A é uma galáxia elíptica gigante, localizada a cerca de 10 milhões de anos luz da Terra. A figura combina uma imagem óptica com linhas escuras traçando os lobos de emissão em rádio (equivalentes aos jatos do desenho à esquerda) e uma imagem infravermelho superposta (em vermelho) feita pelo satélite ISSO.

Atualmente, com os modernos radiotelescópios, é possível estudar em detalhes a estrutura das radiofontes e descobriu-se algo bastante interessante sobre sua forma geral. A maioria delas tem uma estrutura "dupla" e a emissão de rádio localiza-se principalmente nas extremidades dessa estrutura, em regiões que chamamos de componentes extensas (Figura 6.13). Elas encontram-se separadas por centenas de milhares de anos luz e a radiogaláxia situa-se entre ambas as componentes. Freqüentemente a região central é também uma radiofonte que também contém duas

componentes emissoras separadas tipicamente por somente algumas centenas de anos luz. Dividimos então as radiofontes em extensa (as estruturas externas) e compactas (as regiões na própria radiogaláxia).

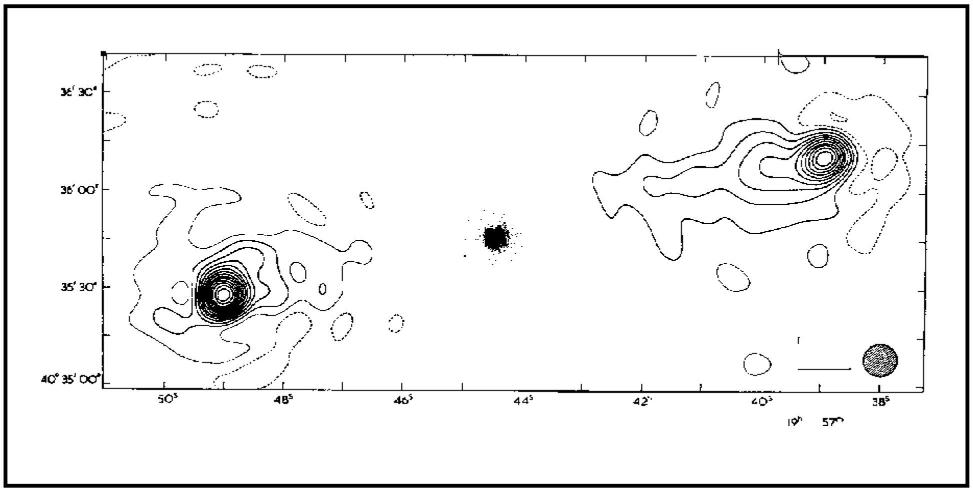


Figura 6.13 – Mapa em rádio de Cignus A, uma radiofonte clássica. A imagem central (na forma de uma pequena borboleta) representa a região emissora no óptico. As duas estruturas simétricas em relação ao centro são os chamados lobos emissores e emitem uma enorme quantidade de energia na faixa de rádio. O tamanho típico dessas estruturas em rádio é da ordem de alguns milhões de anos-luz.

Os quasares foram inicialmente identificados como radiofontes fracas e, posteriormente, como estrelas estranhas na nossa própria Galáxia que eram fortes emissoras de rádio. A descoberta de sua real natureza aconteceu em 1963, quando Marteen Schimdt descobriu que as linhas espectrais do objeto 3C 273 estavam deslocadas de sua posição original no laboratório de cerca de 16%, na direção de comprimentos de onda mais longos. Em outras palavras, a fonte tinha um desvio para o vermelho (ou "redshift") de 0,16 e estava se afastando de nós com uma velocidade de 16/100 da velocidade da luz. Nota-se, na Figura 6.14, a diferença entre as posições das linhas no espectro de diversas galáxias distantes e as posições das linhas H e K do cálcio, deslocadas em função da distância.

Por hora, é interessante comentar que um desvio para o vermelho de 0,16 corresponde, grosseiramente, a uma distância de 2 bilhões de anos-luz. Depois disso, muitas outras radiofontes foram identificadas como objetos semelhantes à estrelas, mas com grande desvio para o vermelho. O nome QUASAR vem da contração de QUASI-STELLAR RADIO SOURCE e está hoje associado a fontes remotas que emitem grandes quantidades de energia e que apresentam um grande desvio para o vermelho em suas linhas espectrais (Figura 6.15).

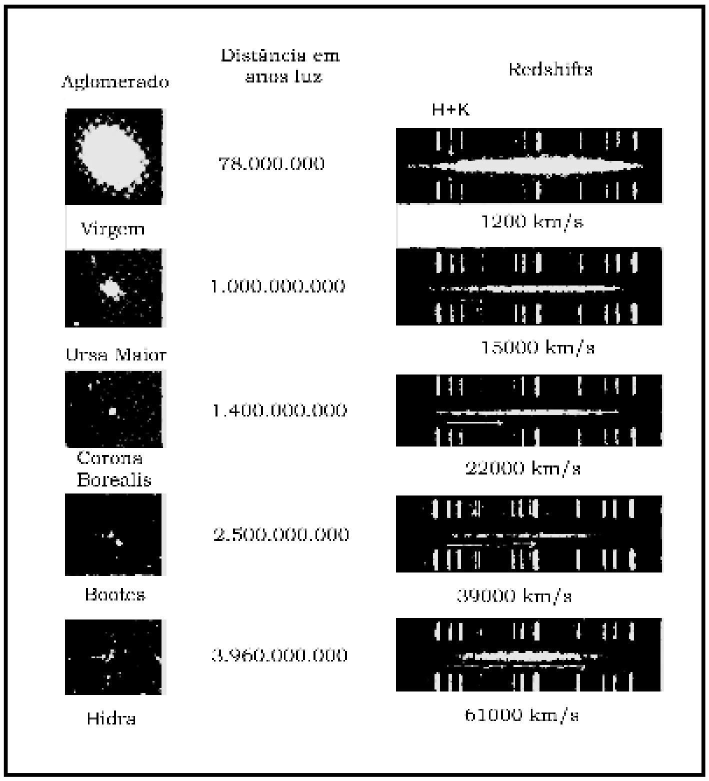


Figura 6.14 – Relação redshift x distância para diversas fontes extragalácticas. As flechas à direita indicam o deslocamento das linhas H e K do cálcio (Cortesia do Observatório Palomar).

Mas o que são os quasares? Ainda não se tem uma resposta satisfatória para essa pergunta... a resposta mais aceita (mas absolutamente não unânime) é que eles são objetos semelhantes a galáxias, mas localizados a distâncias MUITO maiores. E, para

aparecerem no céu com o aspecto de estrelas fracas, mas situados a distâncias tão grandes, sua taxa de geração de energia deve ser fenomenal! Além disso, os quasares apresentam uma variação, às vezes regular, na emissão de radiação que é notável em alguns poucos dias (no óptico) ou mesmo horas (em raios X) de observação. Como a variabilidade na emissão de um objeto não pode acontecer num tempo menor do que a luz leva para se propagar de um lado a outro desse mesmo objeto, a variação na luminosidade emitida nos dá uma estimativa do tamanho dele.

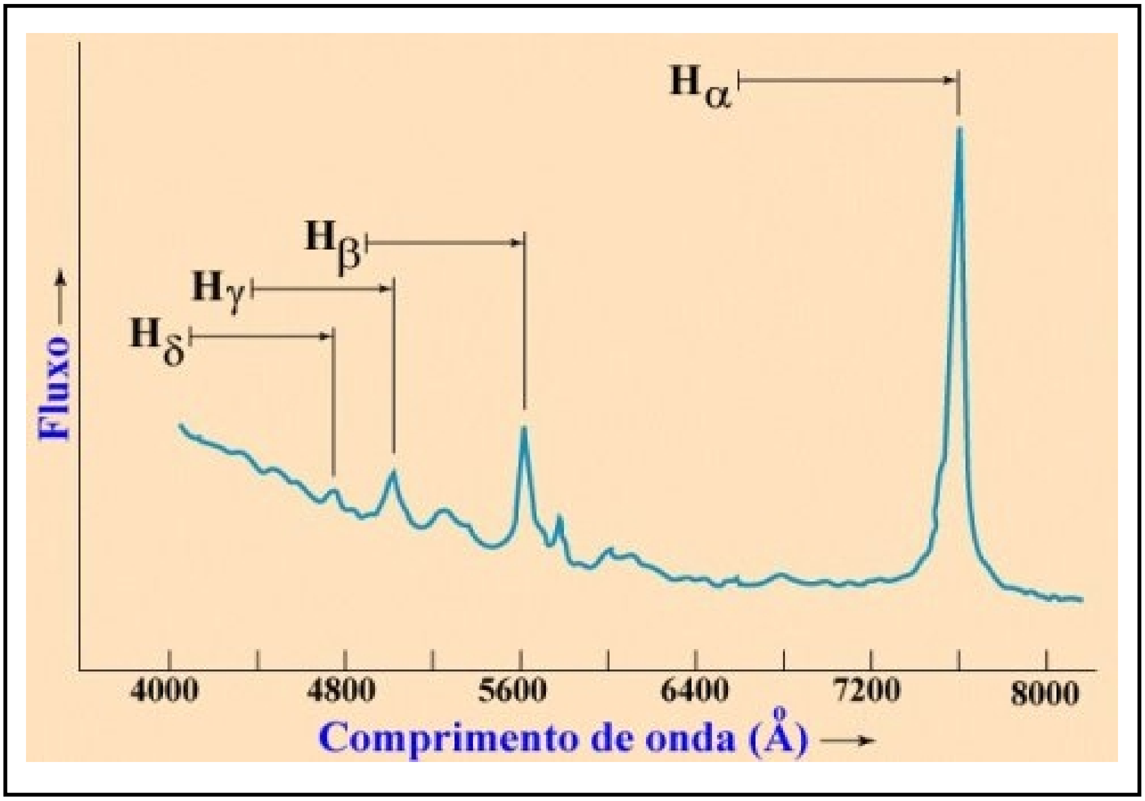


Figura 6.15 – Posição das linhas de emissão do H observadas em quasares típicos. As linhas horizontais em $H_{\alpha,\ \beta,\ \chi,\ \delta}$ representam a magnitude do deslocamento, em unidades de comprimento de onda.

Observações de quasares na faixa de raios X e uma interpretação cosmológica (associada à idade e à distância que tais objetos se encontram) sugerem que o núcleo de um quasar deve ter o tamanho aproximado do nosso sistema solar, mas emitindo uma

energia cerca de 10 trilhões de vezes maior que a do Sol. É natural, portanto, que essa hipótese não seja um consenso entre astrônomos, devido à sua desproporção.

Os quasares são bastante semelhantes às radiogaláxias e também podem ter componentes compactas ou extensas. Na verdade, nem sempre os astrônomos conseguem distinguir perfeitamente entre um quasar e o núcleo brilhante de uma radiogaláxia (Figura 6.16). Possivelmente quasares e núcleos de radiogaláxias são o mesmo objeto, que se comporta de forma diferente ao longo de sua evolução.

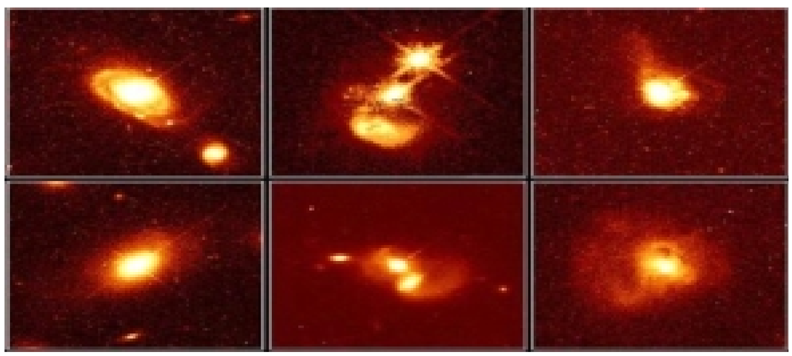


Figura 6.16 – Regiões hospedeiras de quasares.

Ainda não se sabe também qual é o mecanismo que alimenta essa produção fenomenal de energia. Parece ser consenso que a transformação de energia gravitacional em energia luminosa é o mecanismo alimentador, mas isso pode ocorrer de diversas maneiras. Hipóteses como contração do gás que sobrou após o processo de formação da galáxia, estrelas supermassivas girando a enormes velocidades e possuindo um campo magnético intenso (conhecidas como spinars) ou mesmo buracos negros gigantescos no núcleo de uma galáxia vêm sendo levantadas por astrônomos nas últimas décadas. A hipótese do buraco negro central é a mais aceita atualmente e justificaria, ao mesmo tempo, o tamanho compacto da fonte e sua intensa produção de energia, uma vez que um buraco negro com um bilhão de vezes a massa do Sol é capaz de gerar, durante a sua vida, uma energia equivalente a 100 milhões de vezes essa mesma massa. Ela pode

inclusive explicar o porque de um quasar ser uma fonte de ondas de rádio, utilizando a hipótese de que o gás sugado para dentro do buraco negro pode, devido ao movimento espiralado semelhante ao da água correndo para dentro de um ralo de pia, atuar como um dínamo e produzir feixes de partículas que seriam ejetados em direções opostas. Esses feixes ativariam as regiões extensas mencionadas no começo dessa seção. A Tabela 6.1 contém uma lista de diversos objetos que, embora sejam também galáxias, foram classificadas separadamente em função de algumas características peculiares, mencionadas na segunda coluna da tabela. A Figura 6.17 mostra uma imagem do quasar 3C 219 no óptico e em rádio.

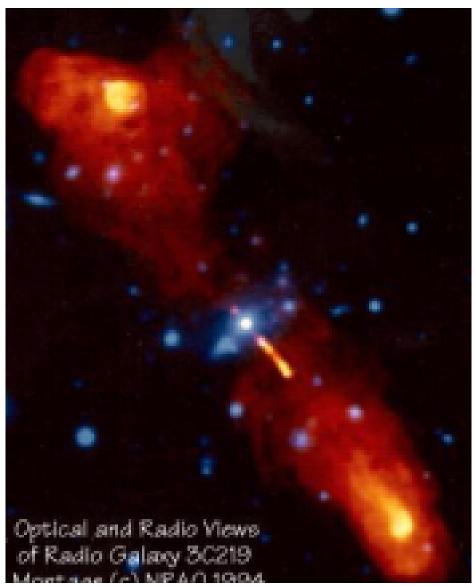


Figura 6.17 – Imagens superpostas do quasar 3C 219. No centro encontramos a componente óptica, observado no óptico. Observe o jato fraco de matéria saindo da fonte (parte central da imagem). À mesma fonte medida em rádio mostra o forte jato, com o formato aproximado de um taco de beisebol na parte inferior direita da figura.

TABELA 6. 1 – DIVERSOS TIPOS DE GALÁXIAS ATIVAS E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

7. GALÁXIAS ATIVAS	
8. Seyferts	9. Galáxias espirais com núcleo brilhante. Observação do núcleo mostra linhas de emissão e emissão em rádio
10. Galáxias N	11. Galáxias elípticas com núcleo brilhante. Algumas são radiofontes.
12. Objetos BL Lacertae	13. Provavelmente galáxias elípticas com núcleo muito brilhante. Observação do núcleo mostra uma emissão contínua sem nenhuma particularidade e polarização bastante variável.
14. QSOs	15. Objetos quase estelares semelhantes aos quasares, mas que não apresentam a emissão na faixa de rádio característica daqueles. Apresenta também desvios para o vermelho bastante grandes.

Segundo Fred Hoyle, um famoso astrônomo britânico, falecido em 2002, o entendimento de porquê existem diferentes tipos de galáxias e como elas se formaram é um dos problemas mais importantes que existem hoje em astronomia. As propriedades das estrelas individuais que formam as galáxias é assunto abordado pela astrofísica e astronomia, enquanto o fenômeno da formação das galáxias toca a área da cosmologia. Pode-se dizer que o estudo das galáxias cria uma ponte entre a astronomia e astrofísica convencional de um lado e a cosmologia do outro.

6.6. A ESCALA DE DISTÂNCIA COSMOLÓGICA

Todo o estudo da astronomia depende, fundamentalmente, de se conhecer a que distância se encontra o objeto estudado para, a partir daí, se determinar o seu brilho intrínseco e estudar as propriedades da radiação que chega até nós. Historicamente, os

modelos cosmológicos concebidos pelo Homem envolviam a Terra, a Lua, o Sol, os planetas e as estrelas distantes e, desde o tempo da civilização grega tem-se feito determinações do tamanho da Terra e das distâncias Terra-Sol e Terra-Lua. O aparecimento dos telescópios, no séc. XVII, só veio aumentar a necessidade de se “mapear a estrada cósmica”, começando com a nossa vizinhança mais próxima.

A idéia, acredita-se que inicialmente formulada por Emanuel Kant, que nebulosas elípticas eram na verdade aglomerados enormes de estrelas, trouxe ao Homem a necessidade de entender melhor os diferentes objetos que ele avistava no céu. A descoberta dos aglomerados de galáxias e da expansão do Universo, no séc. XX, acentuou esse problema. Os astrônomos resolveram, então, sistematizar as maneiras de determinar as distâncias até esses objetos, para poder realizar o “mapeamento cósmico”. Nessa seção vamos estabelecer as bases para a discussão, feita no capítulo sobre Cosmologia, que diz que quanto maior a distância que um objeto se encontra de nós, maior a velocidade com que ele se afasta. A pergunta que vamos responder nessa seção é como os astrônomos medem as distâncias aos objetos extragalácticos.

Conforme comentado nos capítulos anteriores, medidas de paralaxe são utilizadas para estimar as distâncias a estrelas próximas. Entretanto, os erros nessas medidas limitam o uso das paralaxes a distâncias inferiores a cerca de 100 anos-luz. Estrelas Cefeidas e estrelas Novas podem ser usadas para medir distâncias na nossa Galáxia e até galáxias próximas. Eles possuem características bastante marcantes (tais como a intensidade do brilho ou a variabilidade regular) que permitem sua identificação em outra galáxia. A comparação é feita entre objetos do mesmo tipo, cuja paralaxe de um deles tenha sido determinada. Como a intensidade da luz emitida decai com o inverso do quadrado da distância entre fonte e o observador, é possível estimar a distância até objetos mais distantes.

Os métodos utilizando Cefeidas permitem medidas razoavelmente seguras de distâncias até cerca de 10 milhões de anos luz; a partir daí torna-se mais e mais difícil identificar Cefeidas individuais nas galáxias. Para atingir distâncias maiores é necessário utilizar outros calibradores padrão, cujo brilho e/ou tamanho angular intrínsecos conhecidos podem ser comparados ao brilho e tamanho de objetos semelhantes, mas localizados a distâncias maiores. Naturalmente, o truque nesse processo é ter certeza que escolhemos um critério adequado para reconhecer que observamos o mesmo tipo de objeto visto na nossa vizinhança.

Com o “mapeamento da estrada cósmica” até algumas centenas de milhões de anos-luz da Terra, uma nova questão aparece claramente aos astrônomos: por que existem algumas escalas de aglutinação preferenciais no Universo? Em outras palavras, por que o Universo segue uma hierarquia de distribuição de matéria, mas somente até um certo ponto?

6.6.1. HIERARQUIAS

Se tirarmos uma “radiografia” do Universo, veremos que sua estrutura é hierárquica. Além das galáxias em pares, observamos grupos (constituído de algumas poucos a algumas dezenas de objetos, num raio de cerca de 1 milhão de anos-luz – essa é a hierarquia mais comum, com a maior parte das galáxias sendo encontradas em grupos), aglomerados (alguns milhares de objetos, num raio de cerca de 10 milhões de anos luz) e superaglomerados (contém cerca de 100 a 1000 aglomerados num raio de aproximadamente 100 milhões de anos-luz). Encontramos uma espécie de parede de galáxias a uma distância de aproximadamente 450 milhões de anos-luz e, a partir daí, não existe nenhuma evidência de outro nível na hierarquia de aglutinação da matéria (Figura 6.18). Aparentemente, ao tentar enxergar o Universo além de 450 milhões de anos-luz não encontramos nenhuma estrutura porque estamos olhando para uma região/época em que

as galáxias ainda não haviam se formado. Conforme mencionamos antes, olhar para os confins do Universo é a mesma coisa que observar regiões num passado remoto, perto da época em que o próprio Universo se formou.

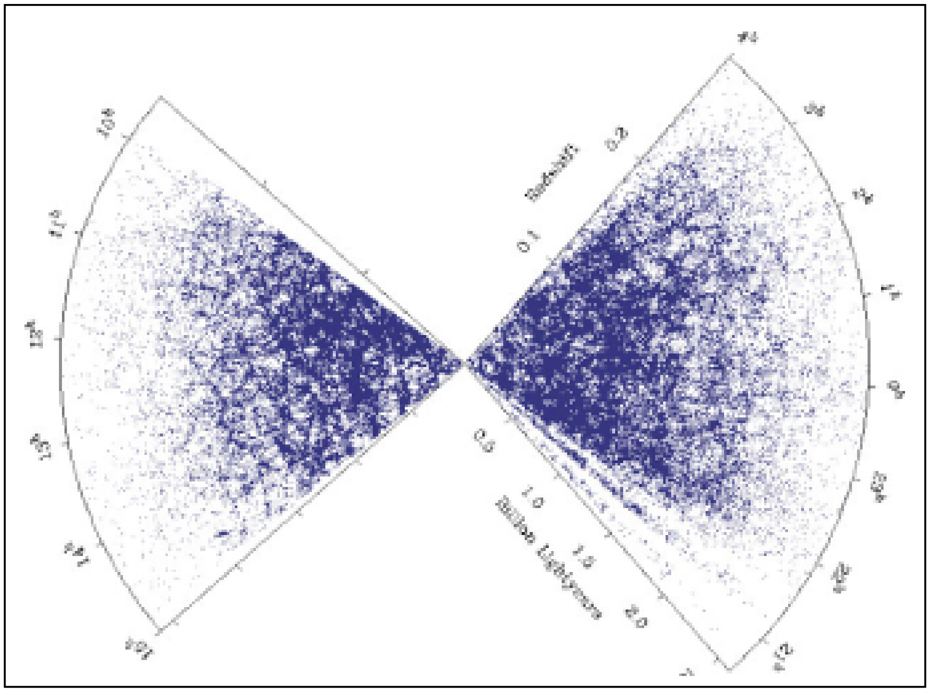


Figura 6.18 – A distribuição de galáxias no Universo próximo feita pelo 2dF Survey (http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS).

O aglomerado mais próximo de nós é o aglomerado de Virgem, localizado a cerca de 50 milhões de anos-luz (na direção da constelação de Virgem). Ele contém cerca de 200 galáxias brilhantes, das quais 68% são espirais, 19% são elípticas e o resto é constituído de galáxias irregulares ou não classificadas (já visto nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.9). Localizado a cerca de 350 milhões de anos-luz, o aglomerado de Coma é o segundo mais próximo e contém alguns milhares de galáxias de todos os tipos já comentados. Ao contrário de Virgem, em Coma a maioria das galáxias são elípticas ou S0 (cerca de 80%) e somente uns 15% são classificadas como espirais ou irregulares. Duas características são notáveis nos aglomerados ricos como Coma: a) a relativa ausência de galáxias espirais e b) a existência de uma ou duas supergigantes elípticas próximo ao centro do aglomerado.

6.6.2. DISTÂNCIAS TÍPICAS

Estamos acostumados, no nosso dia a dia, a pensar e trabalhar com distâncias e medidas em termos das nossas próprias dimensões; quando precisamos pensar em coisas muito grandes e muito pequenas, dimensões menores que décimos ou centésimos de milímetros, ou milhares de quilômetros já são difíceis de quantificar mentalmente. Se pensarmos, então, nas distâncias típicas que envolvem os fenômenos astronômicos, veremos que elas encontram-se, muitas vezes, além da nossa realidade e mesmo da imaginação. Vamos montar uma tabela que nos mostra, em termos gerais, as relações de tamanho entre objetos no Universo que conhecemos:

TABELA 6.2 – ESCALA DO UNIVERSO CONHECIDO (ADAPTADA DE FERRIS, PÁG. 225)

RAIO (METROS)	OBJETOS CARACTERÍSTICOS
10^{26}	Universo observável
10^{24}	Superaglomerados de galáxias
10^{23}	Aglomerados de galáxias
10^{22}	Grupos de galáxias
10^{21}	Nossa Galáxia (Via Láctea)
10^{18}	Nebulosas gigantes
10^{12}	Sistema Solar
10^{11}	Atmosfera exterior das estrelas gigantes vermelhas
10^{9}	Sol

10^8	Planetas gigantes (Júpiter, p. ex.)
10^7	Estrelas anãs, planetas como a Terra
10^5	Asteróides, núcleos de cometas
10^4	Estrelas de nêutrons
1	Seres humanos
10^{-2}	Molécula de DNA (eixo longo)
10^{-5}	Células vivas
10^{-9}	Molécula de DNA (eixo curto)
10^{-10}	Átomos
10^{-14}	Núcleos dos átomos pesados
10^{-15}	Prótons e nêutrons
10^{-35}	Escala de Planck; quantum de espaço

É interessante frisar que, em Astrofísica Extragaláctica e Cosmologia, trabalhamos com as maiores distâncias que um ser humano pode imaginar; algo entre 22 e 26 ordens de grandeza maior que suas próprias dimensões! Não é de se admirar que, ao extrapolar as distâncias para valores cada vez maiores, as incertezas envolvidas sejam também grandes. Tipicamente, a incerteza sobre o tamanho do Universo e, indiretamente, sobre sua idade, vem dos problemas em se calibrar e extrapolar a distância até os objetos mais distantes. A Lei de Hubble, que descreve a velocidade de recessão das galáxias, pode ser usada para estimar as dimensões típicas do nosso Universo e será discutida em detalhes no capítulo sobre Cosmologia.

6.7. REFERÊNCIAS

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal

1. "O despertar da Via Láctea". Thimothy Ferris. Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romanceado, mas que cobre de forma bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.

2. "A Brief History of Time". Stephen Hawking. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título "Uma breve história do tempo". Ainda assim, um texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.

3. "Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe". Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, escrito com o objetivo de passar ao leitor os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.

4. "The Physical Universe". Frank Shu. University Science Books, 1982. Livro texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.

5. ASTRONOMIA: Uma Visão Geral do Universo. Orgs. Amâncio Friaça, Elisabete Dal Pino, Laerte Sodré, Jr. e Vera Jatenco-Pereira, EDUSP, 2000.

6. Revistas "Scientific American Brasil" e "Ciência Hoje". Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.

7. “Foundations of Astronomy”. Michael Seeds. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Um dos pontos altos do livro são as caixas de texto com questionamentos e as perguntas no final de cada capítulo.

Capítulo 7

COSMOLOGIA*

Carlos Alexandre Wuensche **

* Revisado em junho/2003

** e-mail: alex@das.inpe.br

COSMOLOGIA

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

7.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas temos percebido um aumento rápido no conhecimento sobre a nossa vizinhança cósmica e, com as observações de objetos mais e mais distantes, a fronteira do Universo parece ter sido empurrada para os confins do tempo. Somos a primeira geração de seres humanos capazes de perceber os grandes detalhes da História Cósmica, das origens do Universo até o desfile das galáxias pelos céus. Nosso futuro será fortemente influenciado pela apreciação e entendimento dos processos físicos que ocorrem no Universo. Nesse capítulo apresentaremos um breve resumo da História da Astronomia e discutimos os constituintes do Universo nas maiores escalas conhecidas, bem como as idéias relativas às suas origens e evolução. Discutiremos também as observações que nos permitem formular um modelo mais consistente de Universo, conhecido como o Modelo Cosmológico Padrão (MCP) e um pequeno ensaio sobre o futuro do Universo.

7.1.1 UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

As origens históricas de uma visão cosmológica do Universo, estão diretamente ligadas aos conceitos míticos que povoaram as religiões dos povos antigos. Como as fronteiras do "mundo conhecido" eram pouco conhecidas, cada civilização adequava seu "universo" ao mundo terreno, Sol, Lua e planetas. Essa associação tinha raízes numa necessidade de organizar o "Cosmos" e, de alguma forma, explicar a origem do lugar onde o Homem vivia. Durante o curso da História da Astronomia, a associação de corpos errantes no céu com divindades nos remete diretamente ao conceito de magia, que hoje pode ser vista como uma forma de sintetizar o mundo natural e seu relacionamento com o Homem. Nessa época o Homem vivia num mundo de relacionamentos e afinidades, cuja pretensa manipulação era feita por magos, com o objetivo de compreender e tentar dominar as forças da natureza. Nesse sentido, enquanto "experimentador de técnicas mágicas", o mago pode ser considerado como o

antepassado do cientista e, por que não?, do astrônomo, uma vez que muitas das crenças mágicas envolviam rituais em que a necessidade de se prever ou aproveitar os ciclos celestes era premente. As crenças inconstantes do Homem a respeito do céu e o desenvolvimento de suas idéias sobre a natureza serviram como um fio que guiou a espécie humana através do labirinto de diferenças culturais em várias civilizações. Essas crenças agiram também como um espelho, refletindo as atitudes científicas do Homem em função de sua época.

A cosmologia na Idade Antiga pode ser bem representada pela astronomia egípcia e mesopotâmica e seu apogeu ocorreu no florescer da Grécia Clássica. A civilização grega clássica (600 a.C.) foi a sociedade antiga que mais avançou em Astronomia e em outras áreas do conhecimento humano como filosofia, matemática e artes. Contudo, a mitologia grega era bem criativa. Essa civilização sofreu muita influência dos antigos egípcios e dos babilônicos tanto na área mitológica como na científica. A cosmologia grega, por exemplo, foi uma fusão evoluída das idéias egípcias, fenícias, mesopotâmias, minoanas e micênicas. Muitos filósofos, pensadores e cientistas gregos contribuíram para o crescimento da astronomia.

A civilização árabe deu continuidade à busca do conhecimento científico e a evolução cultural proporcionados pelos antigos gregos. Foram os árabes que nomearam boa parte das estrelas e constelações. Entretanto, com exceção da civilização árabe, durante a Idade Média (de 800 a 1450 d.C.), a evolução do pensamento científico foi praticamente inexistente. O modelo de Ptolomeu (Universo Geocêntrico) transformou-se em dogma adotado pela religião cristã e, em conseqüência, pela civilização cristã. Era muito cômodo admitir a Terra do Homem como centro do Universo. No fim da era medieval, um estudante germânico (Nicolau de Cusa) imaginou que a Terra não era o centro do Universo propondo que a mesma girava em torno de seu eixo. Imaginou que as estrelas fossem outros sóis situados a distâncias diferentes num espaço infinito.

Entretanto, somente com o Renascimento Europeu associado ao período das grandes viagens de navegação, a Ciência Ocidental retomou seu crescimento. O início da revolução astronômica vem com a introdução do sistema heliocêntrico para o Universo, por Nicolau Copérnico, com a utilização do telescópio por Galileu e com a descoberta das Leis de Kepler. A partir desses três marcos e das descobertas científicas de Newton (séc. XVII), a Astronomia começou a evoluir de forma quantitativa, separando-se cada vez mais da astrologia e caracterizando-se como ciência *de fato.* Entretanto, a noção real de que um "universo" existe além do nosso sistema solar só veio aparecer no séc. XIX e a cosmologia, enquanto ciência individual, somente passou a ser considerada no séc. XX. É dessa época que partiremos para nosso estudo do Universo.

7.2 O QUE É COSMOLOGIA?

A Cosmologia é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução do Universo e é uma ciência multidisciplinar. Seu objetivo é entender como o Universo se formou, por que ele tem a forma que hoje vemos e qual será o seu destino no futuro. As principais ferramentas utilizadas para esse entendimento vêm da Física, Matemática e da Astronomia. Da Física vem as leis que descrevem fenômenos físicos nos laboratórios da Terra e, ao verificarmos que elas descrevem fenômenos semelhantes em lugares distantes do Universo, podemos reafirmar seu caráter universal. De certa maneira, um cosmólogo utiliza o Universo como um imenso laboratório. A Matemática nos dá a linguagem utilizada para registrar os processos observados e que permitem uma descrição precisa dos fenômenos astronômicos. Da Astronomia tomamos emprestadas as técnicas de observação do céu, medição do tempo e determinação das escalas de distância envolvidas. Observações astronômicas de objetos e fenômenos distantes são utilizadas pelos cosmológos na montagem do quebra-cabeças que é entender o Universo. Podemos ainda incluir, no rol das ferramentas, a Química e a Filosofia. A primeira é importante no estudo da composição da matéria no meio interestelar e a segunda fornece o arcabouço que insere a Cosmologia na hierarquia do pensamento humano.

7.2.1 QUAIS PROBLEMAS A COSMOLOGIA SE PROPÕE A RESOLVER?

Ao observar o céu, o homem pode "definir" o tamanho do seu Universo em função das limitações dos instrumentos disponíveis e, consequentemente, da região acessível a seus olhos. Isso não quer dizer que não existam fenômenos além das regiões que conseguimos ver. Nosso universo tem as fronteiras tecnológicas (que serão superadas assim que inventarmos instrumentos mais potentes) e as impostas pelas leis físicas. Nesse caso estamos limitados pelas velocidades com que a radiação eletromagnética (que pode ser luz, ondas de rádio, raios X) se propaga.

Assim, é fácil estender o raciocínio e imaginar que existem fenômenos astronômicos que já aconteceram, mas cuja informação (sinal eletromagnético na forma de ondas de rádio, por exemplo) ainda não chegou até nós porque a fonte encontra-se muito distante da Terra. Além da questão da distância existe o problema de que a atmosfera da Terra absorve a radiação eletromagnética incidente em quase todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. As únicas "janelas" visíveis do solo são a óptica e a faixa em rádio. A Figura 7.1 apresenta um diagrama que relaciona os comprimentos de onda com o mecanismo de absorção dentro da atmosfera.

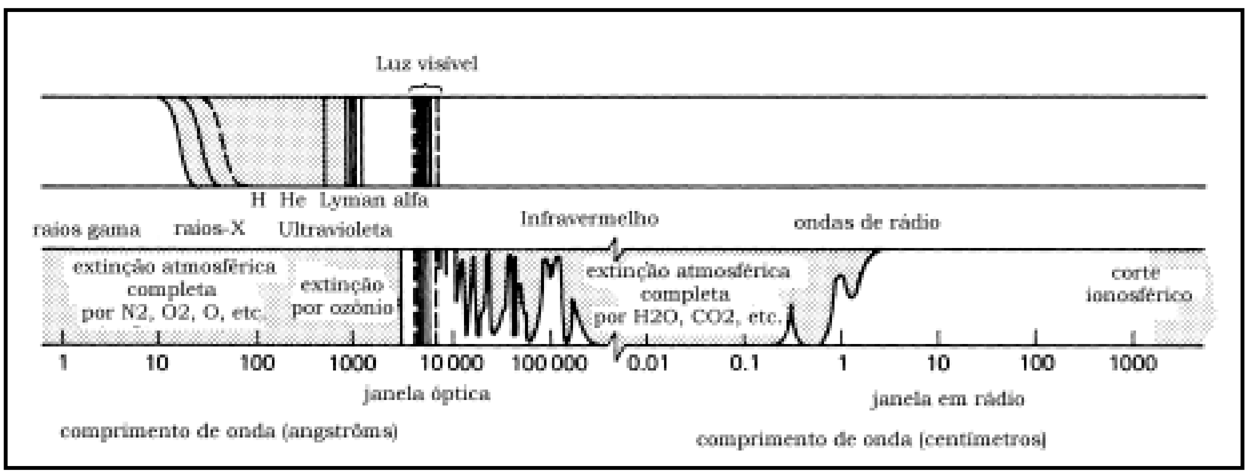


FIGURA 7.1 - Espectro da radiação eletromagnética, de raios gama até ondas longas de rádio. Na faixa inferior da figura, as regiões de absorção de radiação estão

marcadas em cinza. A faixa superior mostra as faixas de radiação acessíveis a observações a bordo de satélites ou foguetes, acima da atmosfera

Estudando a radiação eletromagnética que essas fontes emitem, podemos estimar a que distância elas se encontram, mapear o Universo e procurar respostas para muitas das perguntas fundamentais formuladas pelo Homem desde que começou a olhar para o céu... Em última instância, sempre estaremos questionando nossas origens: quem somos? De onde viemos? Para onde vamos? Contudo, parte da motivação para o estudo da Cosmologia vem do aparecimento de questões mais recentes, relacionadas com o desenvolvimento da Ciência em geral, tais como:

- Como o Universo foi formado e como ele terminará?
- Como as estruturas de matéria em grande escala se formaram?
- Qual o tamanho e a geometria do Universo?
- O que se pode aprender sobre a física estudando o Universo?
- A leis da Física oferecem uma descrição aceitável da criação?

A pesquisa fundamental em Cosmologia envolve técnicas e instrumentação extremamente sofisticadas, muitas vezes desenvolvida especificamente para este tipo de pesquisa. Parte da motivação para se desenvolver os supercomputadores vem da necessidade de se usar processadores mais e mais poderosos para simular a formação e evolução das primeiras galáxias. Além disso, certas condições físicas no Cosmos são extremas e jamais poderão ser conseguidas na Terra, de modo que a Cosmologia associa-se à Física para utilizar o Universo como um grande laboratório. Finalmente, o apelo intelectual e o conhecimento das perspectivas sobre o Universo em que vivemos podem servir até como fator de orientação ética, direcionando as idéias do Homem e fornecendo parâmetros para nortear escolhas que podem definir o futuro da nossa

espécie. Nesse sentido, a Física, a Astronomia e a Cosmologia não geram conhecimento supérfluo e irrelevante – sua importância é vital.

7.3 COSMOLOGIA E O UNIVERSO EM QUE VIVEMOS

O objetivo final da Cosmologia é explicar o Universo em termos de uma teoria simples e esteticamente atraente. Entretanto, de todas as ciências, a Cosmologia é a mais exigente em termos de extrapolação de resultados e conceitos, já que as escalas de tempo e distância envolvidas nos problemas cosmológicos são da mesma ordem de grandeza da idade e tamanho do Universo que queremos observar. Além disso, ao contrário de um experimento em laboratório, não podemos criar (ou não existem) vários universos para que possamos fazer uma análise estatística completa de suas propriedades.

Nessa seção serão discutidas as maiores escalas de distância em que a matéria consegue se agrupar. Elas são também as maiores observadas pelo homem e constituem o que chamamos de “Universo Observável”.

Ao estudarmos a distribuição de matéria no Universo, da forma apresentada neste curso, por exemplo, partimos dos menores constituintes para o “todo”. É fácil perceber que existe uma hierarquia no Universo, em que matéria vai se juntando para formar uma determinada estrutura que, numa escala maior, comporta-se como uma pequena parte que será juntada às outras para formar uma estrutura ainda maior e assim sucessivamente, até um limite em que o Universo torna-se homogêneo, isto é, sem estruturas aparentes.

A teoria mais aceita no momento é que o Universo foi criado a partir de um estado inicial extremamente denso e quente, com fótons com energias inimagináveis e pares de

partículas sendo criados e aniquilados a cada instante. Como o Universo passou desse estado totalmente desorganizado (o "plasma primordial”) para o estado organizado que observamos hoje, aparentemente violando a Segunda Lei da Termodinâmica? Essa é uma das perguntas que vamos tentar responder neste capítulo.

As galáxias mais próximas são brilhantes e permitem um estudo mais detalhado de suas propriedades. À medida que olhamos para objetos mais e mais distantes, fica mais difícil medir a radiação emitida e por essa razão astrônomos e cosmólogos sempre estão desenvolvendo instrumentos mais sofisticados. Olhando “mais fundo” no Universo, é possível estimar a época de nascimento e a evolução das galáxias e a sua distribuição inicial no espaço. Essa distribuição descreve as chamadas estruturas em grande escala. Não sabemos exatamente em que época isso aconteceu, porque temos muito pouca informação sobre esse período do Universo, mas sabemos que isso deve ter acontecido quando o Universo tinha entre 100 milhões e 1 bilhão de anos de idade.

Em contraste, sabemos muito mais sobre o Universo mais jovem, com cerca de 380 mil anos de idade! Esse período é explorado a partir das informações que extraímos do estudo da RCFM (doravante RCFM), descoberta por Arno Penzias e Robert Wilson em 1965, e da sua associação com o estado primordial denso e quente mencionado anteriormente.

A Figura 7.2 mostra uma fatia do Universo com a Terra, nos dias de hoje, localizada no vértice das duas regiões em forma de pizza. Conforme olhamos para pontos mais e mais longe do vértice, olhamos para objetos mais e mais distantes de nós e, como conseqüência, cada vez mais jovens. Propriedades dos objetos mais próximos podem ser medidas diretamente com os equipamentos disponíveis atualmente para os astrônomos, de modo que a Figura 7.2 é mais precisa no vértice. À medida que nos afastamos, nosso conhecimento baseia-se menos nas observações diretas e mais nos cálculos e no

conhecimento que temos sobre as leis da Física.

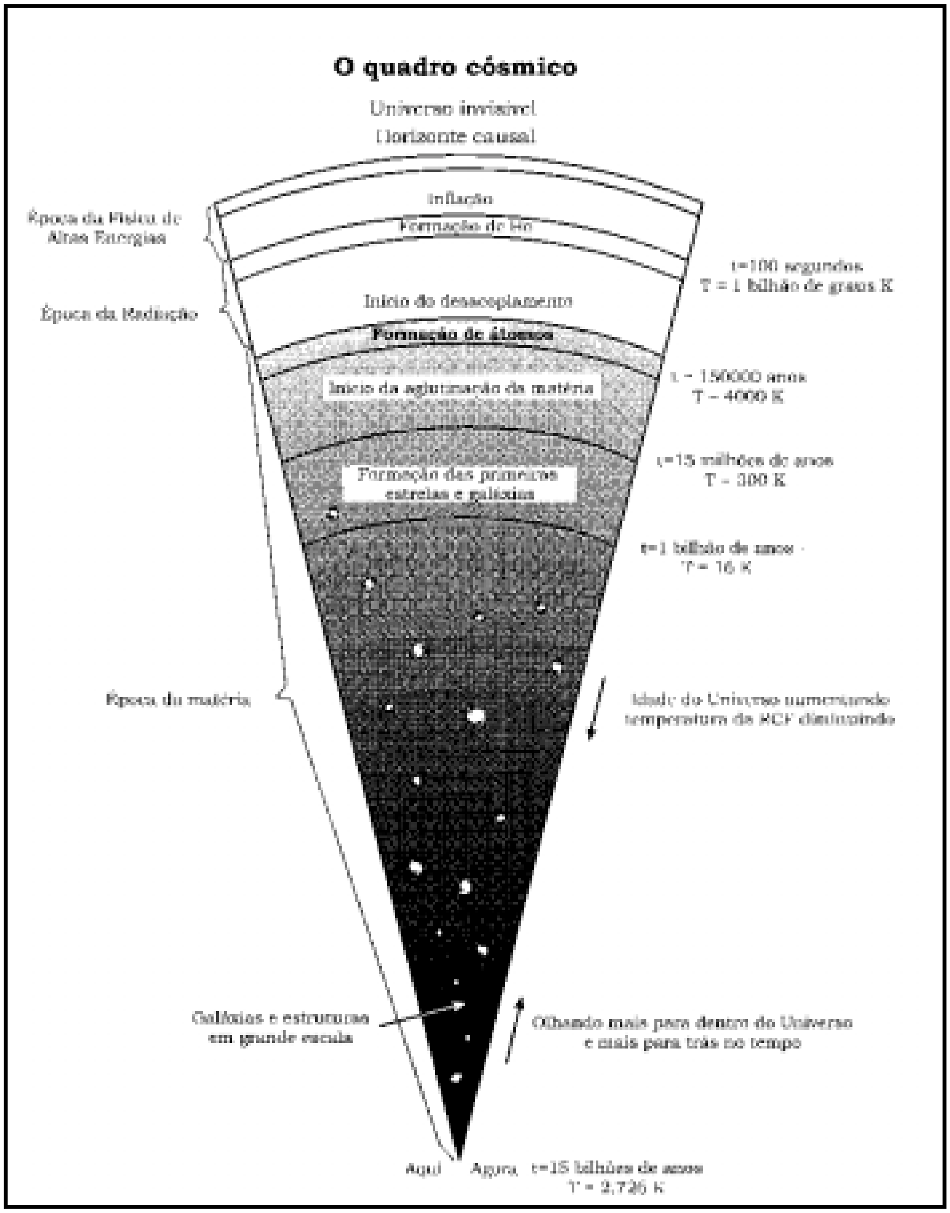


FIGURA 7. 2 – Fotografia em corte da história do Universo. Regiões mais próximas do vértice encontram-se mais próximas de nós no tempo.

7.4 O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

Até cerca de 1950, a Cosmologia era uma ciência essencialmente teórica, com praticamente nenhum suporte observacional ou atividade experimental que pudesse validar os modelos de Universo então vigentes. Esses modelos possuíam as mais diversas características e a imensa maioria evoluiu a partir das soluções das equações que Albert Einstein propôs para descrever o movimento de corpos em referenciais acelerados: a chamada Teoria da Relatividade Geral, ou TRG. Recentemente, alguns fatos experimentais, em conexão com a TRG, criaram um paradigma de modelo cosmológico, conhecido como Modelo Cosmológico Padrão (doravante MCP). Embora criticado por alguns cientistas, este modelo é o que melhor descreve o Universo que observamos e baseia-se nos seguintes pontos:

- Não há região ou observador no espaço que ocupe uma posição preferencial em relação a outra qualquer. Essa afirmativa é conhecida como o Princípio Cosmológico;
- Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes e;
- A existência da RCFM, a abundância de determinados elementos químicos leves (hidrogênio, deutério, hélio e lítio) e a observação da velocidade relativa de afastamento de galáxias distantes, que são observações que dão consistência ao MCP.

O item 1 foi enunciado por Nicolau Copérnico em fins do século XV e vem sendo utilizado na imensa maioria dos modelos cosmológicos desde então. Como praticamente todos os processos observados na evolução das estrelas e galáxias podem ser descritos em termos da Física conhecida, acredita-se que as leis que descrevem os fenômenos físicos da nossa Galáxia são as mesmas em qualquer parte do Universo. Essa crença vem de podermos observar e descrever fenômenos que ocorrem em galáxias distantes

com exatamente o mesmo formalismo matemático usado para descrever fenômenos locais.

O item 2 vem sendo estudado em detalhes nos últimos anos e verificado com base em resultados de diversos levantamentos de distâncias de galáxias (os “redshift surveys”, feitos em instituições como o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics – CfA e o 2dF). A homogeneidade e isotropia do Universo começam a ser verificadas a partir de distâncias da ordem de 600 milhões de anos luz (~ $6x10^{26}$ cm, que eqüivalem a ~ 6 bilhões de trilhões de quilômetros). Até distâncias dessa ordem ainda são observados diversos tipos de estrutura, tais como vazios, paredes e estruturas filamentares. Desse ponto até o ponto onde se formou a RCFM (~ 13 bilhões de anos luz, equivalentes a $1,23x10^{28}$ cm ou 120 bilhões de trilhões de quilômetros) existe uma lacuna de informações, mas estimativas teóricas sugerem que esse foi o intervalo de tempo necessário para que a distribuição inicial de matéria evoluísse para formar as primeiras estruturas do Universo.

O item 3 apresenta as evidências observacionais que sustentam o MCP, sendo que a abundância dos elementos químicos nos traz informações sobre o processo da nucleossíntese primordial, a RCFM reflete o estado de equilíbrio termodinâmico no Universo jovem e a velocidade de recessão das galáxias distantes é a maior evidência do processo de expansão do Universo.

O cenário previsto pelo MCP, baseado nos pontos acima, sugere que o Universo foi criado há cerca de 13,7 bilhões de anos, a partir de um estado de densidade, temperatura e pressão infinitas. Esse processo é conhecido como BIG BANG (Grande Explosão) e o Universo começou a expandir-se e resfriar-se a partir desse instante, considerado o “instante zero (t=0)”. Todos as referências a intervalos de tempo cosmológicos são feitas, em geral, em relação ao “instante zero”. Até cerca de 0,01 segundos, a

temperatura era muito alta e havia formação e aniquilação incessante de pares de partículas elementares. Após a temperatura cair para valores abaixo de 1 bilhão de graus K, a produção e aniquilação de pares e as reações nucleares cessaram, deixando como resultado elétrons, prótons e nêutrons (nossos conhecidos, que formam a matéria comum que constitui a Terra e as moléculas orgânicas a partir das quais nosso organismo é formado). Também restaram fótons e neutrinos, partículas difíceis de serem detectadas e que possuem massa extremamente pequena (cujo valor foi recentemente estimado), e carga elétrica nula.

A combinação de prótons e nêutrons deu origem aos primeiros elementos químicos formados no Universo: deutério (D), hélio (He) e lítio (Li). Com o Universo em expansão e conseqüente resfriamento, a temperatura atingiu o valor de 3000 K, 380 mil anos após a explosão. Nesse momento, prótons e elétrons - que encontravam-se livres até então - começaram a combinar-se para formar átomos de hidrogênio e o plasma de matéria e radiação deixou de existir. Com a combinação, o processo de interação entre fótons e elétrons, conhecido como espalhamento Thomson, tornou-se insignificante e o Universo tornou-se transparente à radiação (Figura 7.3). A trajetória de um fóton, antes limitada devido às colisões sucessivas com os elétrons livres, passou a ser da mesma ordem de grandeza do Universo. Este processo é conhecido como *desacoplamento*. Devido ao processo de expansão, a temperatura dos fótons da RCFM vem decrescendo proporcionalmente à taxa de expansão, mas mantendo exatamente as mesmas características. Hoje sua temperatura é de aproximadamente 2,726 graus K, sendo praticamente uniforme em todo Universo.

Como a variação de temperatura é inversamente proporcional à taxa de expansão, podemos estimar o aumento relativo do tamanho do Universo nesse período. Se a temperatura na época do desacoplamento entre a matéria e a radiação era cerca de 3000 K, e a temperatura atual é da ordem de 3 K (a temperatura equivalente de um objeto imerso em hélio líquido), o fator de decréscimo foi 1000 (3000/3). Logo, o Universo

hoje é mil vezes maior que na época da recombinação. Por outro lado, a partir dessa época a matéria estava livre para condensar-se em estruturas que evoluíram nas galáxias que hoje observamos, já que a pressão exercida pela energia dos fótons não mais estava presente. Os átomos puderam então se associar, aumentando a atração gravitacional e o colapso das nuvens de hidrogênio primordial, criando as primeiras estruturas do Universo.

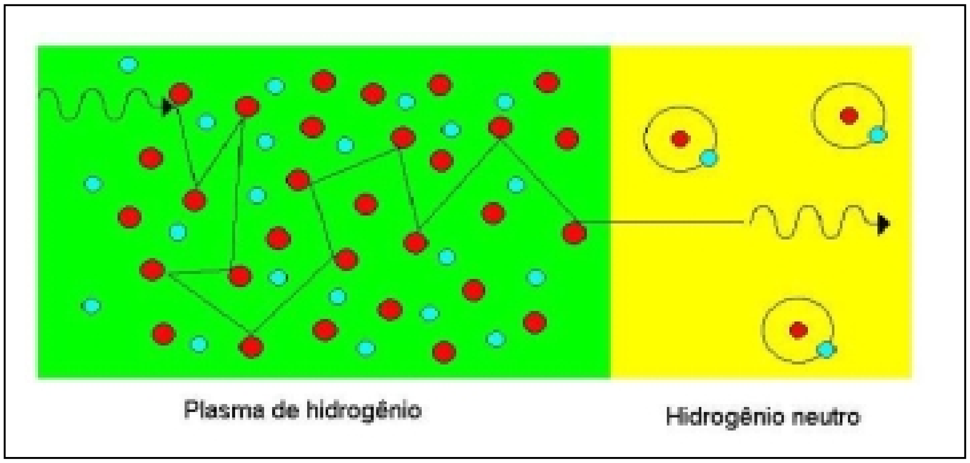


Figura 7.3 – O desacoplamento da matéria comum da radiação. Na figura à esquerda, o espalhamento Thomson obriga os fótons a percorrerem um caminho aleatório. Após a recombinação**,** os fótons podems ser propagar livremente pelo Universo.

Uma das sugestões mais atraentes (e também a mais simples) para explicar esse processo de formação é que a gravidade foi atraindo matéria para regiões que eram inicialmente um pouco mais densas que suas vizinhanças. Durante milhões de anos, esse processo foi acontecendo, sem interrupção, e foi comprimindo essas regiões porque, à medida que mais matéria ia sendo trazida, a gravidade tornava-se mais e mais forte, até que galáxias e outros objetos começaram a se formar.

O quadro acima pode ser resumido da seguinte maneira: a dinâmica do Universo pode ser descrita pela Teoria da Relatividade Geral e o suporte observacional é dado pelas observações da RCFM, da velocidade de recessão das Galáxias e pela abundância de elementos leves (H, He, D, Li). O paradigma da instabilidade gravitacional é responsável por utilizar as flutuações de matéria para formar as estruturas que observamos e consideramos que essas flutuações, não importa o tamanho, tem essencialmente a mesma amplitude. As perguntas que o MCP deixa sem resposta, entretanto, são tão interessantes quanto as que ele responde: porque a geometria do Universo deve ser aproximadamente plana? Por que a RCFM apresenta flutuações tão pequenas? Quem gerou as flutuações de densidade que evoluíram para formar as estruturas? Onde estão as partículas estranhas, previstas pela Física de Partículas e provavelmente criadas no Universo jovem?

7.5 ESTRUTURA E EVOLUÇÃO

Conforme mencionamos anteriormente, observamos que as galáxias distantes estão se afastando umas das outras e deduzimos que o Universo está em expansão. Isso nos leva a pensar que ele teve um começo! Nosso primeiro desafio é medir seu tamanho, idade e forma. Por tamanho entendemos a maior distância que podemos estudar; a idade é contada em relação ao instante zero e a forma está ligada à geometria do Universo, definida pela quantidade de matéria existente.

A Cosmologia tenta traçar um perfil da evolução do Universo dessa época densa e quente, quando o Universo era composto de uma mistura de gás e radiação em equilíbrio térmico, para o estado extremamente complexo e diversificado que vemos hoje, com galáxias, estrelas e planetas concentrados em certas partes do céu e regiões vazias em outras. As estruturas parecem ter sido formadas a partir de pequenos desvios do equilíbrio no Universo jovem e a força da gravidade fez com que regiões mais

densas (com mais matéria) se expandissem mais lentamente e se aglutinassem para formar galáxias estruturas.

Ainda assim pouco sabemos sobre esse processo de evolução... Quanto tempo depois do BIG BANG a matéria levou para se aglutinar em galáxias? E quanto tempo foi gasto na formação das primeiras estrelas e planetas? O processo aconteceu das pequenas para as grandes estruturas, com estrelas e aglomerados de estrelas se formando primeiro e se juntando para formar galáxias (uma evolução hierárquica conhecida como “bottom-up”), ou aconteceu ao contrário, com os enormes superaglomerados se fragmentando em nuvens menores que formaram estruturas do tamanho das galáxias (conhecido também como “top-down”)?

O destino do Universo será determinado pela sua densidade média, que está, por sua vez, ligado à geometria e à taxa de expansão. Se a densidade for baixa, o Universo seguirá eternamente no processo de expansão em que se encontra atualmente. Entretanto, se a densidade for maior do que um certo valor crítico (da ordem de 10^{-29} $g.cm^{-3}$), a força da gravidade poderá ser capaz de frear e mesmo reverter esse processo de expansão, fazendo com que o Universo se contraia e, eventualmente, termine sua “vida” numa grande contração. Finalmente, ainda existem as fortes evidências que o Universo é composto de algo desconhecido, com propriedades bastante estranhas; na verdade, cerca de 97% da composição química do Universo é desconhecida. Dividimos essa parte desconhecida entre matéria e energia escuras: os termos serão explicados mais a frente. Como 97% da composição do Universo é constituída de matéria e energia escuras, para conhecer seu destino – e o nosso também – é necessário determinar o que são esses componentes e como eles influenciam na dinâmica do Universo.

7.6 O SUPORTE OBSERVACIONAL DO BIG BANG

Embora a intensidade da RCFM seja extremamente uniforme em todo o céu, a distribuição local de galáxias é extremamente irregular, com flutuações na densidade de galáxias por volume sendo extremamente alta. Mapas dessa distribuição, feitos a partir da medida de seus "redshifts", revelam um padrão notável de estruturas semelhantes a filamentos conectando concentrações de galáxias entremeadas com regiões vazias e aproximadamente esféricas. A Figura 7.4 é resultado de anos de levantamentos de espectros durante as décadas de 70 e 80, com telescópios relativamente modestos. Essa distribuição de galáxias, filamentos e vazios é conhecida como estrutura em grande escala. Discutiremos aqui o suporte observacional mencionado na seção anterior, cujas informações devem ser capazes de traçar o perfil de evolução do Universo desde seus primeiros instantes até o momento atual.

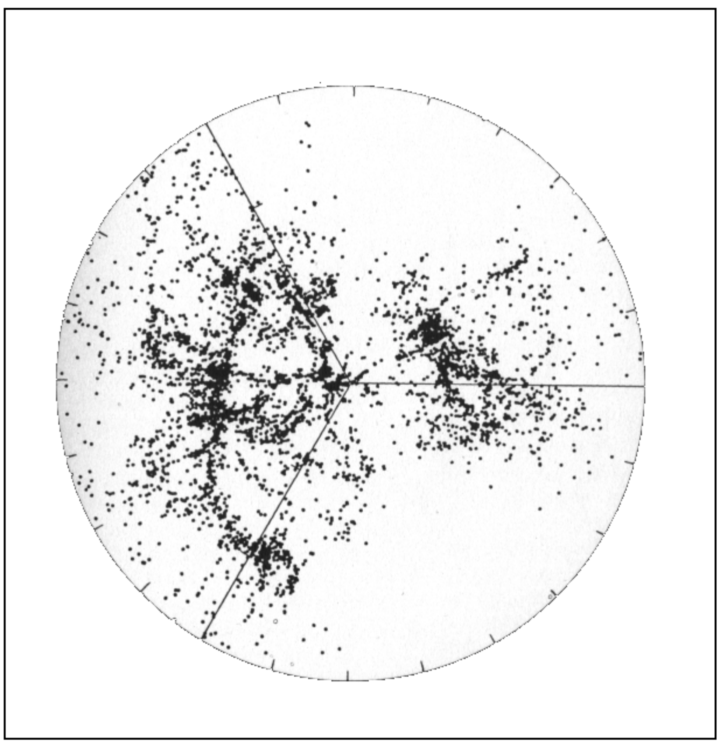


FIGURA 7. 4 – Levantamento de galáxias em função do seu redshift, feito nas décadas de 70 e 80. O centro da figura representa o observador, ou seja, nós. A borda do círculo representa as regiões mais distantes do Universo.

7.6.1 A VELOCIDADE DE RECESSÃO DAS GALÁXIAS

O que é, exatamente, a velocidade de recessão das galáxias? Em 1923, o astrônomo Edwin Hubble começou um estudo de Cefeidas em “nebulosas espirais”, incluíndo a nossa vizinha Andrômeda (a galáxia M31), visível a olho nu. Usando a **relação período-luminosidade** para as Cefeidas, ele calculou a distância que elas se encontravam da Terra, obtendo um valor de 800.000 anos luz para Andrômeda e valores semelhantes para outros objetos. Os resultados mostraram que estes sistemas eram enormes conjuntos de estrelas e, definitivamente, encontravam-se fora da nossa Galáxia. Eles passaram a ser também chamados de galáxias e o conceito de “distância extragaláctica” estava criado.

Mas a mais importante descoberta de Hubble foi que as galáxias distantes se afastavam de nós e umas das outras. Seu resultado baseou-se na descoberta de uma relação linear entre a distância **D** das galáxias até nós (determinada pela relação período-luminosidade, por exemplo) e a velocidade **v** (determinada pela determinação do redshift das linhas espectrais observadas), escrita da forma $\mathbf{D = H_0.v}$. A constante H_0 é a chamada constante de Hubble. Essas observações mostraram uma “recessão” sistemática e isotrópica, e foram confirmadas até distâncias extremamente grandes. A Figura 7.5 apresenta um diagrama com as primeiras observações feitas por Hubble e a extrapolação usando medidas de objetos mais distantes. Hubble foi forçado a fazer sua descoberta passo a passo, utilizando Cefeidas, variáveis RR Lyrae e estrelas supergigantes para ir calibrando as distâncias até o aglomerado de Virgem (Virgo).

Qualquer observador numa galáxia distante (num Universo em expansão) e que obedece a Lei de Hubble perceberá exatamente esse mesmo fenômeno. É como se o próprio espaço estivesse se expandindo e um observador em qualquer parte dele visse a mesma expansão, em qualquer direção que olhasse. O valor atual para a constante de Hubble $\mathbf{H_0}$, estimada a partir da relação acima é de 71 km/s.Mpc. Esse valor tem dimensão $[t]^{-1}$,

logo é possível, usando os valores medidos de **d** e **v**, fazer uma estimativa da idade do Universo (lembrando que 1 Mpc = 1 Mega parsec ≈ e3x10^{24} cm).

Em homenagem a Edwin Hubble, a NASA colocou seu nome em um telescópio espacial que foi lançado em abril de 1990. Entre vários resultados espetaculares que o Telescópio Espacial Hubble obteve, nos interessa o “Hubble Cepheid Key Project”. A Figura 7.6 é uma versão da Figura 7.5, baseada somente em dados coletados pelo Telescópio Hubble, feita usando medidas de variáveis Cefeídas para determinar as distâncias. A inclinação da curva nos dá o valor da constante de Hubble e a figura mostra que o melhor ajuste às observações é dado pelo valor 70 km/s.Mpc. Com o Telescópio Hubble podemos, assim como Edwin Hubble, estudar Cefeidas, só que localizadas a distâncias 30 vezes maiores que as medidas na época de Hubble.

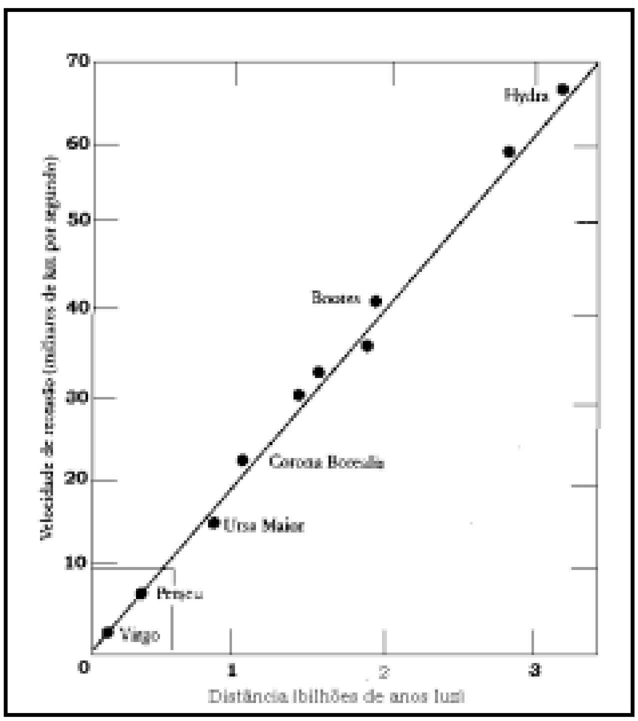


FIGURA 7. 5 – A lei de Hubble é válida por todo o Universo conhecido. Este diagrama inclui os dez maiores aglomerados de galáxias. O quadrado no canto

inferior esquerdo representa as galáxias observadas por Hubble ao descobrir a lei (Adaptada de Ferris, pág. 157).

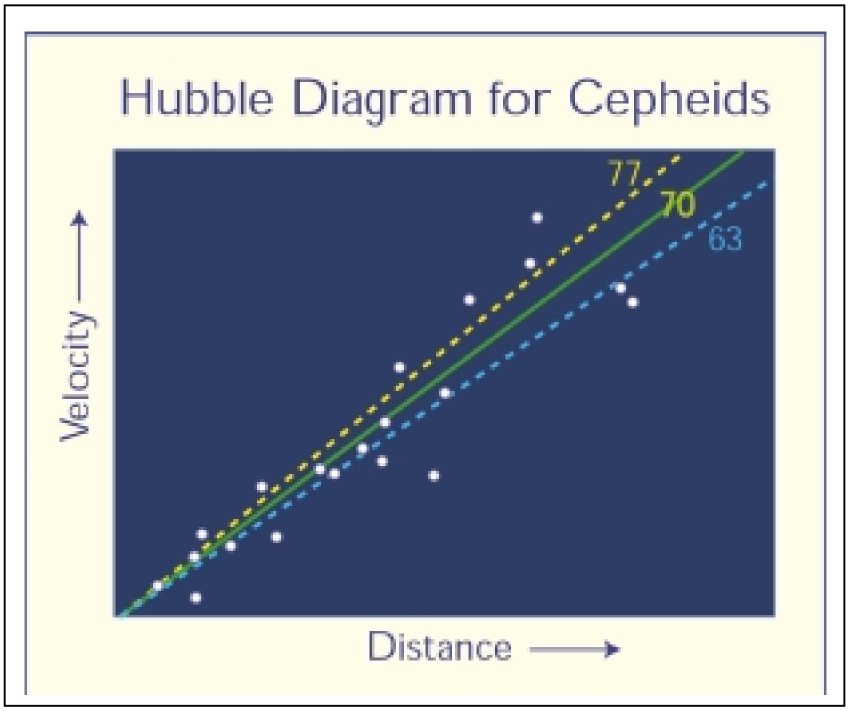


FIGURA 7. 6 - Diagrama distância x velocidade com medidas de Cefeidas feitas pelo Telescópio Espacial. O valor estimado para a constante de Hubble, H_0, com essas medidas, é de 70 km/s.Mpc (Ref: http://hubblesite.org/newscenter/archive/1999).

7.6.2 A RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

A RCFM é uma forte evidência de que o Universo, em uma época qualquer no passado, era muito mais denso e quente do que é hoje. Para produzir uma radiação com suas características, o Universo deveria ser completamente diferente do que vemos hoje nos céus. Nessa época não era possível a existência de planetas, estrelas e galáxias. Ele deveria estar completamente preenchido pelo "plasma primordial", constituído de radiação e partículas elementares extremamente quentes.

Como já dissemos, a idade do Universo é da ordem de 14 bilhões de anos e, desde sua criação, ele vem se expandindo sem parar. A RCFM, formada cerca de 380 mil anos após a criação, foi-se resfriando por causa da expansão e hoje a temperatura medida é de 2,726 graus K. Essa temperatura corresponde à faixa de microondas no espectro eletromagnético e vem de todas as regiões do céu. Além disso, a potência dessa emissão é distribuída num grande intervalo de freqüências, ao invés de estar concentrada numa única freqüência, como acontece com um transmissor de rádio normal.

O estudo da RCFM é feito medindo-se essa emissão ao longo desse intervalo de freqüências e em todas as direções do céu. Das medidas feitas desde sua descoberta (há quase 40 anos atrás), concluímos que ela tem praticamente as mesmas características de quando foi criada, exceto pela temperatura, que vem abaixando por causa da expansão do Universo. A evolução posterior do Universo, durante o processo de formação de estruturas não afetou a RCFM. Ela é considerada um resíduo cósmico praticamente intocado, e nos dá uma excelente oportunidade de estudar os detalhes do Universo jovem. Para que os cosmólogos sejam capazes de entender a origem e a evolução das estruturas que vemos hoje no Universo, é essencial que saibam como eram as condições físicas que existiam naquela época; as características da RCFM são diretamente dependentes dessas condições, de modo que estudar a RCFM certamente ajuda a entender melhor a física do Universo jovem.

O espectro da RCFM pode ser entendido como um conjunto de medidas da intensidade da RCFM em diferentes freqüências. O melhor resultado até a presente data foi obtido pelo satélite COBE e pode ser visto na Figura 7.7. O MCP prevê que a RCFM deve ter um espectro bem peculiar, conhecido entre os físicos como espectro de corpo negro, cuja forma bem definida depende somente da temperatura do corpo emissor. Essa é a primeira característica marcante da RCFM: possuir um espectro de corpo negro a temperatura de 2,726 graus K! O pico dessa curva fica na faixa de microondas; o espectro de corpo negro do Sol, cuja temperatura é de 6000 K, possui o pico numa

freqüência correspondente à luz visível. A explicação mais simples para a forma de corpo negro do espectro da RCFM é que o Universo todo se encontrava a uma mesma temperatura durante os primeiros instantes de sua história. O espaço foi todo preenchido rapidamente com gás quente e partículas, todos à mesma temperatura, mas que se expandiam e resfriavam rapidamente.

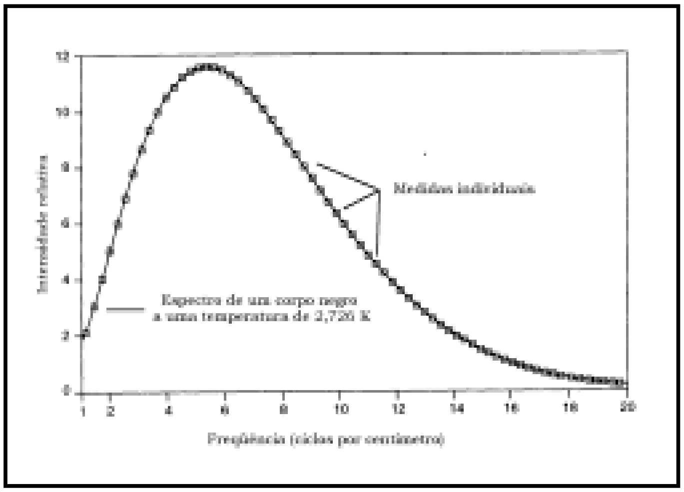


FIGURA 7. 7 – Espectro da RCFM medido pelo satélite COBE. O pico encontra-se próximo da freqüência de 6 cps e possui a forma de um corpo negro a 2,7 graus K.

A segunda característica importante da RCFM é a existência de pequenas variações, em cada ponto do céu, na temperatura de 2,726 K. Essas variações, também chamadas de anisotropias, contém informação sobre a distribuição da matéria no Universo jovem. Os cosmólogos estimaram que a amplitude das anisotropias é de, aproximadamente, uma parte em 100.000 (ou, como dizem os astrônomos, da ordem de 10^{-5}). Como exemplo, podemos comparar essa amplitude a pequenas dobras de 1 mm de altura num lençol de 100 m por 100 m!!! Apesar de pequenas, acredita-se que elas estão relacionadas às sementes das estruturas extremamente complexas que vemos no céu atualmente.

Entretanto, era um fato conhecido dos cientistas que seria muito difícil explicar como o Universo passou do "plasma primordial" para o estado extremamente complexo que vemos no céu, caso não se detectasse as anisotropias da ordem de 10^{-5}, ou seja, se a distribuição das temperaturas da RCFM fosse exatamente 2,726 K em todo o céu (Figura 7.8, imagem superior). Em 1992, o satélite COBE (**Co**smic **B**ackground **E**xplorer), lançado pela NASA com o propósito de estudar as características da RCFM detectou, de maneira conclusiva, que a distribuição de temperatura da RCFM apresenta anisotropias da ordem de 10^{-5} (Figura 7.8, imagem central). Logo após o resultado do COBE, diversos experimentos vêm confirmando a existência de flutuações na RCFM em diferentes escalas angulares. Em 2003, um outro satélite da NASA, o WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe) publicou resultados que mostravam, em detalhes, exatamente o mesmo tipo de estrutura medida em 1992 (Figura 7.8).

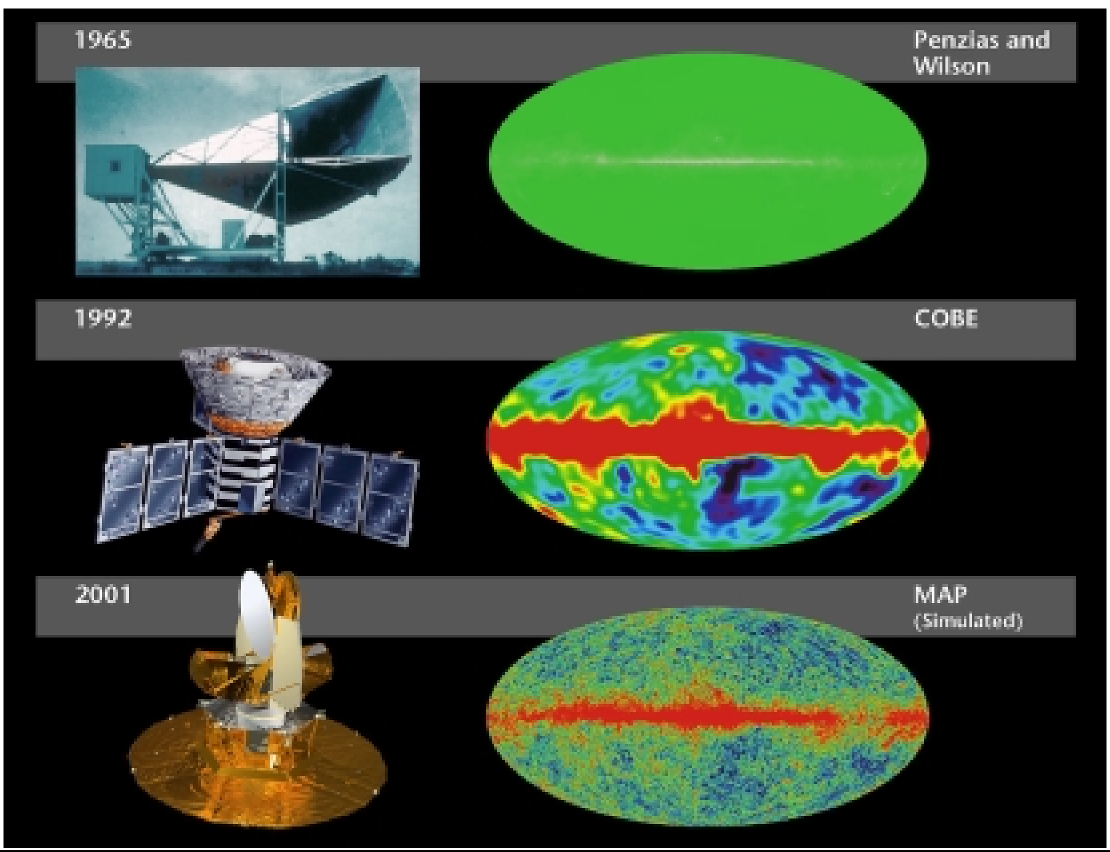


FIGURA 7. 8 – Mapas das flutuações de temperatura, desde as medidas de Penzias e Wilson, passando pelo COBE até o WMAP. As manchas azuis (mais frias), verdes

(no mapa superior correspondem à T=2,726 K e nos mapas central e inferior, a T=0 K) e vermelhas (mais quentes) correspondem às flutuações de temperatura no Universo jovem.

A interpretação da distribuição das flutuações de temperatura está ligada às flutuações de matéria na época do Universo jovem. Devido ao acoplamento entre matéria e radiação, esperava-se que existissem oscilações no fluido, da mesma forma que o som é causado por oscilações no ar (também um fluido). Ao estudar a distribuição das anisotropias encontrou-se a consequência dessas oscilações: uma série de picos, chamados de picos acústicos, que são perfeitamente descritos pela teoria física do oscilador harmônico amortecido. Esses picos, que variam em função da abertura do telescópio utilizado (também chamada de escala angular), contém informações sobre o tipo de matéria que constitui o Universo, qual é a sua idade e se a quantidade de matéria que existe no Universo é capaz de freiar a expansão que hoje observamos.

7.6.3 A NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL E A QUÍMICA DO UNIVERSO

Embora a análise espectral da luz emitida por estrelas e galáxias seja dominada por elementos mais pesados que o hidrogênio e o hélio, aqueles são muito mais raros do que os dois mais leves. Comparativamente, menos de 2% da massa da Galáxia é composta de elementos mais pesados que o hélio. Pode-se aproximar essa abundância dizendo que, se pesarmos toda a massa disponível no Universo, cerca de 75% é hidrogênio, 24% é hélio e 1% corresponde a todo o resto dos elementos presentes na natureza. Os físicos e cosmólogos acreditam que a razão da composição química do Universo ser assim é porque hidrogênio e hélio foram criados nos primeiros instantes do Universo.

A primeira análise nas condições extremas do BIG BANG foi feita por George Gamow, que descobriu que a composição do Universo jovem não deveria conter outros elementos além do H, D, He e Li, nas proporções mostradas na Figura 7.9. Já foi visto

no capítulo sobre estrelas que praticamente todos os elementos mais pesados que o hélio são formados no interior das estrelas, durante as reações nucleares que as fazem brilhar.

O trabalho teórico sobre a nucleossíntese explicou completamente a origem dos primeiros elementos mais pesados que o hidrogênio e somente restou uma explicação cosmológica para a abundância observada do hidrogênio e do hélio. Gamow preparou este terreno, em fins da década de 40 e o MCP fornece a proporção exata observada dos dois elementos: o momento da formação ocorreu entre 0,01 e 100 segundos depois do BIG BANG, quando a temperatura era da ordem de 1 bilhão de graus Kelvin. As observações da abundância de hélio no Universo atual permitem determinar, indiretamente, as condições físicas cerca de dois a três minutos após a criação do Universo. A partir desse ponto, somente podemos deduzir algo sobre o Universo através de cálculos, simulações e especulações teóricas.

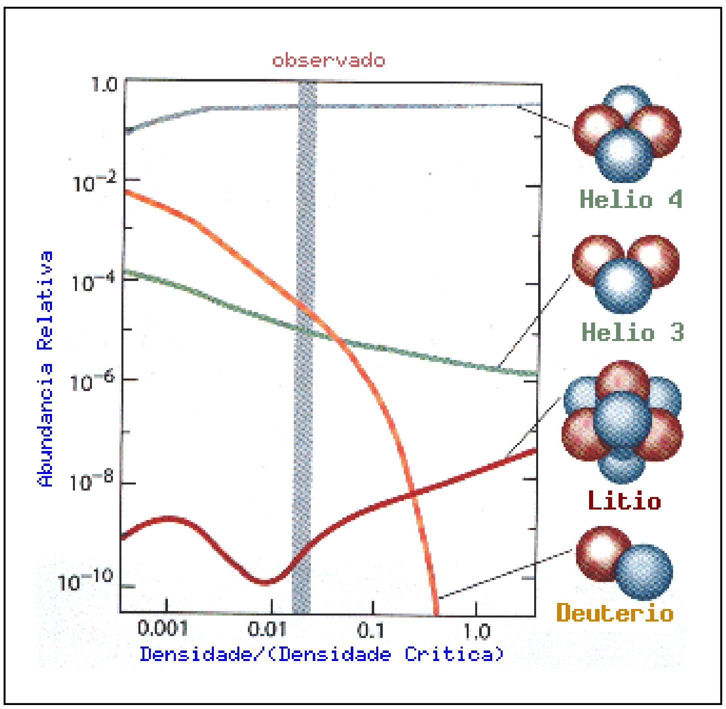


FIGURA 7. 9 – Abundância relativa dos elementos leves em relação ao hidrogênio. A soma dos valores definidos na linha cinza central, para cada um dos elementos à

direita, mais a porcentagem relativa ao hidrogênio (da ordem de 0,75), deve ser igual a 1.

7.7 AS ESTRUTURAS EM GRANDE ESCALA

Face ao que já comentamos sobre as flutuações de densidade primordial, não é surpresa notar que galáxias existam, em sua maioria, em grupos e aglomerados. Galáxias e estruturas em grande escala são conseqüência das mesmas condições a que o Universo jovem estava sujeito, no início de sua vida. O que surpreendeu os astrônomos nas décadas de 80 e 90 não foi a existência, mas o tamanho das estruturas. Vazios típicos de até 200 milhões de anos luz e uma estrutura conhecida como “A Grande Muralha”, que se estende por mais de 500 milhões de anos luz e é a maior estrutura identificada no Universo até a presente data (note a faixa filamentar no lado esquerdo da Figura 7.4) são alguns dos resultados encontrados nos levantamentos de objetos distantes. Já a Figura 7.10 é o resultado preliminar do levantamento de redshifts conhecido como 2dF. Ela mostra, em coordenadas celestes x redshift, a posição de mais de 2 milhões de Galáxias até cerca de 0,7 Mpc da Terra.

Resultados recentes mostram evidências de que existem diversas super-estruturas com dimensões extraordinárias (~ 80 x 100 x 100 Mpc, ~ 70 x 140 x 140 Mpc). Existem ainda evidências, por observações da linha de emissão do hidrogênio da série de Lyman, que encontramos objetos a distâncias até 2700 Mpc, embora eles sejam poucos e espalhados pelo Universo observável (em termos de distribuição angular). De qualquer maneira, a transição entre a região homogênea do Universo (caracterizada pela RCFM) e a região irregular (caracterizada pelas estruturas em grande escala) acontece num intervalo de tempo entre aproximadamente 4-8 bilhões de anos-luz. As distâncias envolvidas no estudo das estruturas em grande escala variam de alguns milhões (tamanhos típicos de pequenos grupos de galáxias) a algumas centenas de milhões de anos luz (distâncias da ordem da “Grande Muralha”). A combinação de medidas dessas

estruturas e das flutuações de temperatura na RCFM são as ferramentas mais poderosas de que dispomos hoje para estudar o Universo jovem e responder as questões formuladas no começo desse capítulo.

Fazer mapas de galáxias em três dimensões requer um conhecimento de quão distantes os objetos se encontram de nós. Isso é feito a partir da determinação dos redshifts: quanto maior o redshift, maior a velocidade e mais distante o objeto se encontra de nós. Dispomos atualmente de alguns catálogos (2MASS, SDOSS, 2dF, SSDS, etc.), cada um com vários milhões de objetos mapeados, enquanto há 20 anos atrás, o número médio de galáxias com redshift conhecido era de apenas 2700.

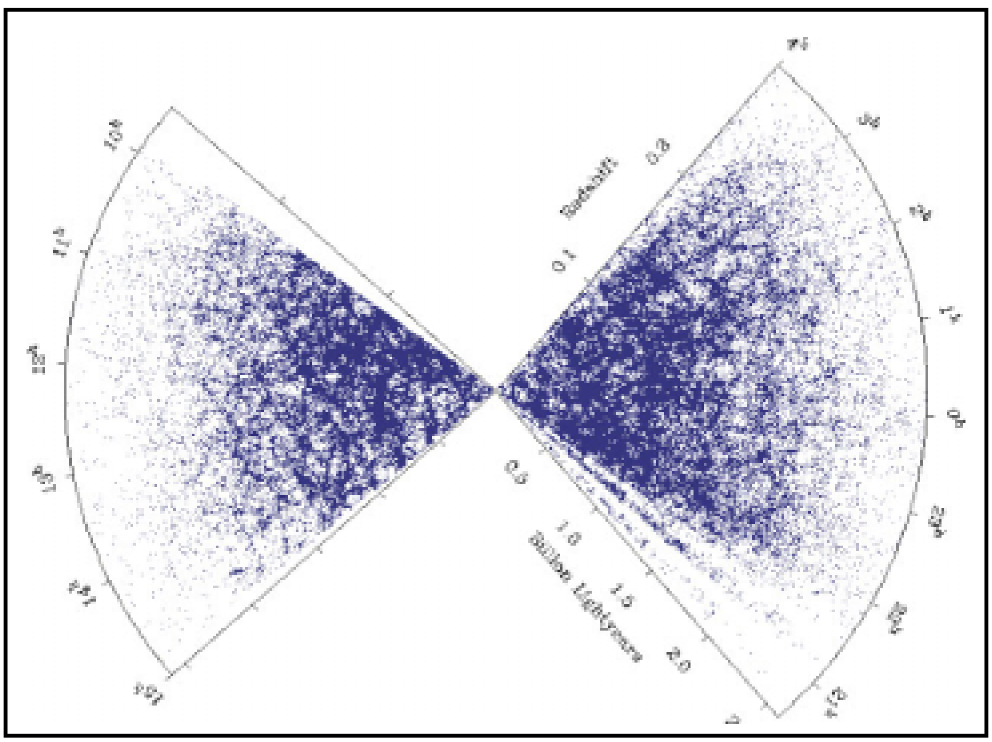


Figura 7. 10 – Distribuição das galáxias vizinhas até cerca de 2 milhões de anos luz.

O objetivo de mapear essas estruturas é ir tão fundo em distância de modo a mapear galáxias perto da mesma época em que a RCFM foi criada. Note que aqui estamos

usando, de modo pouco rigoroso, o fato de que, quanto mais longe em distância podemos enxergar, mais "para trás no tempo" estamos indo. Esses mapeamentos serão equivalentes a tirar fotos do Universo em diferentes épocas e mapear então a evolução desde a época da criação da RCFM (após o desacoplamento entre a matéria e a radiação), até períodos mais recentes, quando o Universo já estava muito mais diferenciado e irregular.

A teoria por trás do estudo das estruturas em grande escala se baseia na solução de equações que descrevem a evolução do Universo. Os cálculos supõem que o Universo jovem possui flutuações aleatórias, energia escura e diversos tipos de matéria escura. As equações que descrevem o acoplamento gravitacional e outros processos físicos relevantes são resolvidas numericamente por supercomputadores. Os cálculos mostram que as flutuações crescem, conforme previsto nas teorias que envolvem instabilidades gravitacionais. Os resultados das simulações computacionais são comparados com as observações feitas, ajustes são feitos nos modelos que os computadores produzem e os cálculos são refeitos. A análise cuidadosa dessas comparações também é capaz de ajudar a selecionar valores confiáveis para a natureza da matéria escura e da energia escura no Universo.

7.8 MATÉRIA ESCURA? ENERGIA ESCURA?

Na década de 80, os astrônomos observaram um fato bastante estranho ao estudar as curva de rotação das galáxias espirais. A Figura 7.11 mostra as curvas de velocidade de rotação devidas ao disco, gás e halo de uma galáxia espiral típica. Devido à grande diferença observada entre a curva da galáxia e a curva do disco, foi levantada a hipótese que o halo continha muito mais matéria do que o imaginado e que essa matéria somente sofria a ação da gravidade, não emitindo nenhum tipo de radiação eletromagnética. Daí o nome "MATÉRIA ESCURA". Podemos mostrar a curva de rotação de uma galáxia

espiral deve variar em função da posição do elemento de massa com a distância até o centro. A relação entre a energia potencial gravitacional e a energia cinética de um elemento de matéria a uma distância r do centro da Galáxia, de acordo com a 2ª lei de Newton, é dada por

$$G\frac{mM}{r^2} = m\frac{V^2}{r}$$

e determinando uma relação para a massa contida dentro de uma esfera de raio R, obtemos:

$$M = \frac{V^2 r}{G}$$

o que sugere que, a velocidade deve aumentar proporcionalmente à massa e, fora dos limites do objeto, cair rapidamente a zero. A Figura 7.11 nos mostra algo completamente diferente:

A curva combinada da Figura 7.11 deveria cair como a curva do disco, caso a matéria do halo fosse desprezível em relação à massa do disco. Entretanto, nota-se claramente que a velocidade do halo também cresce e, para raios maiores que os raios determinados por meio de observações ópticas, tende à velocidade de toda a Galáxia. As estimativas dinâmicas (via leis de Newton) dessa matéria não-luminosa (“escura”) indicam que ela é quase 10 vezes maior que a quantidade de matéria comum (bariônica), como pode ser visto na Tabela 7.1.

Pode-se argumentar que também existe matéria escura bariônica: anãs negras, nuvens moleculares frias (“escuras”) e outros objetos que não emitem luz visível. A resposta é que sempre será possível tentar medir esses objetos feitos de bárions por meio da emissão infravermelho ou rádio. Quanto à matéria não-bariônica, ela somente pode ser percebida através de efeitos da gravidade; pois não emite radiação eletromagnética. Para ela existem diversos candidatos, entre eles o neutrino, que é o mais conhecido. Veremos

que a matéria escura é responsável por algo da ordem de 30% de toda a densidade do Universo e concluímos então que, mesmo falando somente de matéria, somos constituídos de matéria que é a exceção do que existe no Universo. Em outras palavras, praticamente desconhecemos de que tipo de matéria o Universo é feito...

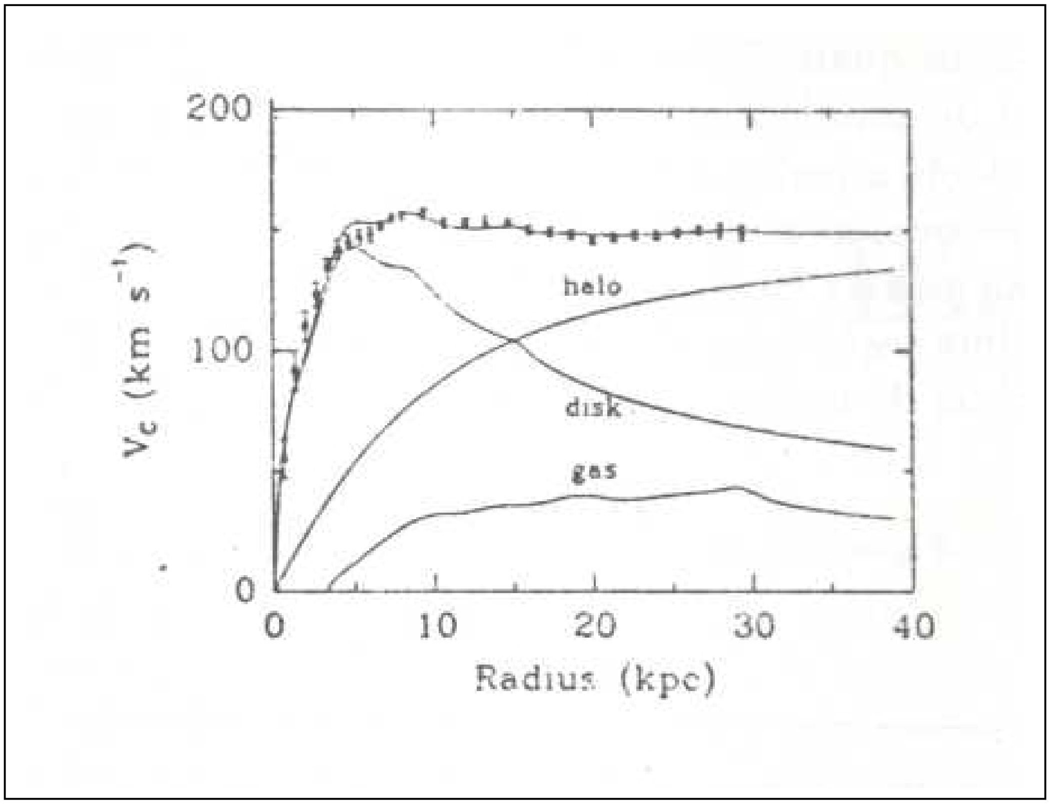


FIGURA 7. 11 – Curva de velocidade radial de galáxia espiral. Note que a curva com os pontos é a combinação das curvas de disco, gás e halo e esperava-se que ela decrescesse para raios maiores que 20 ou 30 kpc.

A energia escura é uma grandeza ainda mais complicada de definir, porque simplesmente não sabemos o que ela é ou como medi-la. Pode-se dar a ela diversos significados, todos mais ou menos relacionados com um termo constante colocado por Einstein nas suas equações da Relatividade Geral para garantir que sua representação do Universo fosse estática. Porém, em 1929, Hubble mostrou que o Universo estava em expansão e a constante colocada por Einstein saiu de moda.

7.9 O QUADRO ATUAL...

A combinação dos resultados observacionais discutidos acima formam o conjunto de informações mais detalhado e importante existente atualmente para estudar a origem e a evolução do Universo. As medidas da RCFM, da distribuição de supernovas tipo I distantes, dos objetos distantes com linhas Lyman alfa e os levantamentos de redshifts, combinados, mostram um quadro do Universo interessante. Medidas separadas fornecem intervalos de valores maiores para os parâmetros cosmológicos, enquanto a combinação de duas ou mais estreitam os intervalos de possibilidades.

TABELA 7. 1 - VALORES DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS COSMOLÓGICOS (EM FEVEREIRO DE 2003)

Parâmetro cosmológico	Valor
Época da reionização t_{rei}	180×10^6 anos
Idade do Universo t_0	$13{,}7 \pm 0{,}2 \times 10^9$ anos
Época do desacoplamento t_{dec}	379×10^5 anos
Redshift do desacoplamento z_{dec}	1089 ± 1
Densidade total Ω_t	$1{,}02 \pm 0{,}02$
Densidade de bárionsΩ_b	0,045
Densidade de matéria Ω_m	0,267
Constante de Hubble H_0	71 km/s. Mpc
Composição Química	4,4% - bárions 22,6% - matéria escura 73% - energia escura

A Tabela 7.1 apresenta os valores dos principais parâmetros cosmológicos, obtidos a partir de uma análise combinada entre os resultados mencionados e os principais componentes da densidade de matéria e energia estão representados na Figura 7.12.

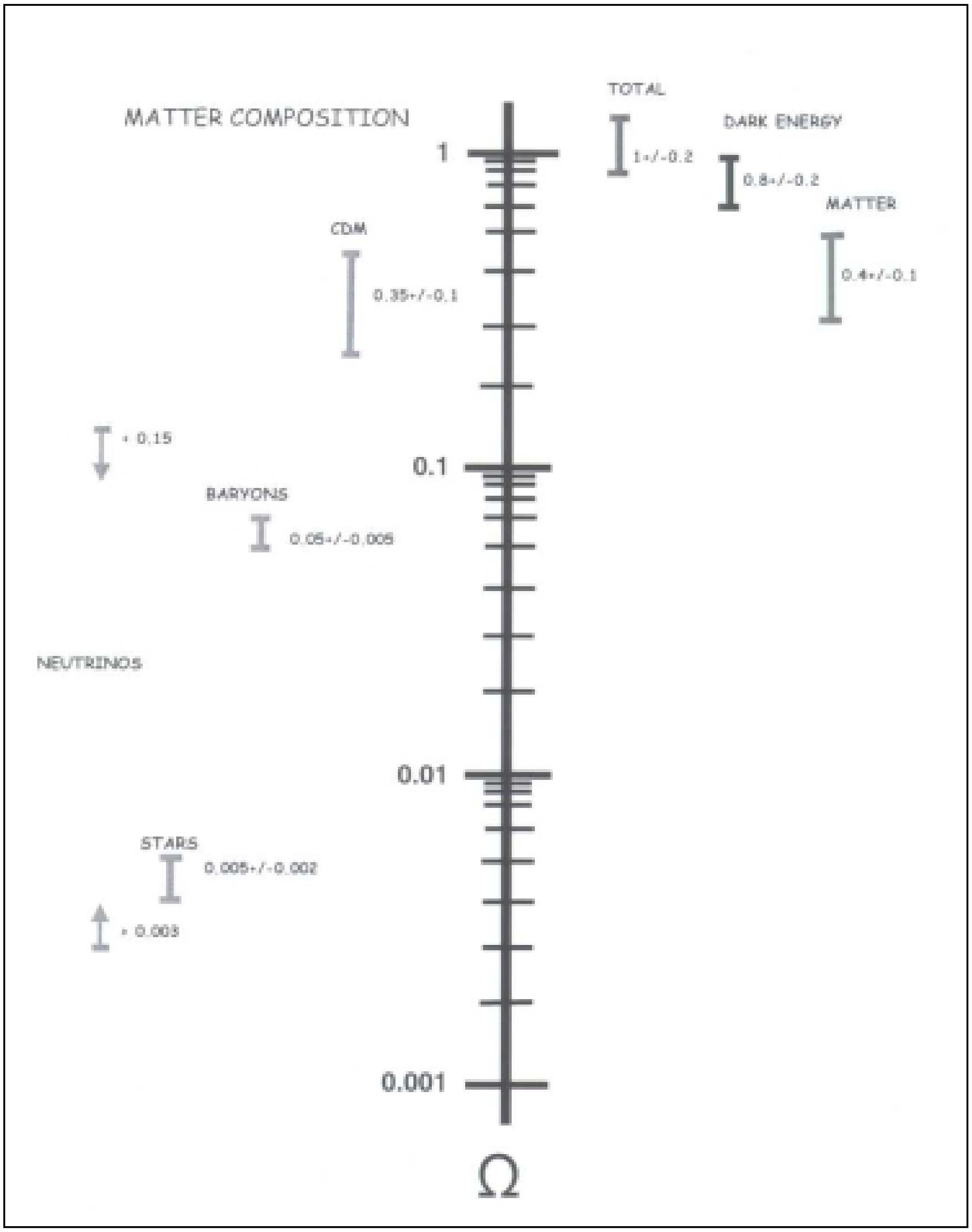


Figura 7. 12 – Distribuição dos componentes de matéria-energia.

Isso nos permite concluir que o Universo possui uma geometria praticamente plana, isto é, em grandes escalas a geometria Euclidiana também é válida, com composição química desconhecida em mais de 96%. Com relação ao mecanismo de expansão, devido à presença da energia escura, sabemos que o Universo, apesar de plano e com densidade de matéria menor que a densidade crítica, possui uma densidade de energia que, além complementar o balanço de densidades para um Universo plano, ainda é responsável pela aceleração do processo de expansão. Assim, em termos dinâmicos, podemos dizer que o Universo atual é plano e, ao invés de ter a expansão gradualmente freiada pela gravidade da matéria existente, ele tem a expansão gradualmente acelerada pela energia escura. A idade estimada, via constante de Hubble, é de 13,7 bilhões de anos.

7.10 O FUTURO DO UNIVERSO

A questão do futuro do Universo está ligada, diretamente, à quantidade de matéria que o Universo possui. A combinação da matéria comum (formada de prótons, nêutrons e elétrons), matéria e energia escura (que não sabemos exatamente do que é feita) determina a dinâmica do Universo (expansão retardada ou acelerada) mas também a geometria (se ele é um Universo aberto, fechado ou plano). A combinação de matéria ordinária, matéria escura e energia escura definem a geometria do Universo, que pode ser esférica, plana ou hiperbólica (Figura 7.13).

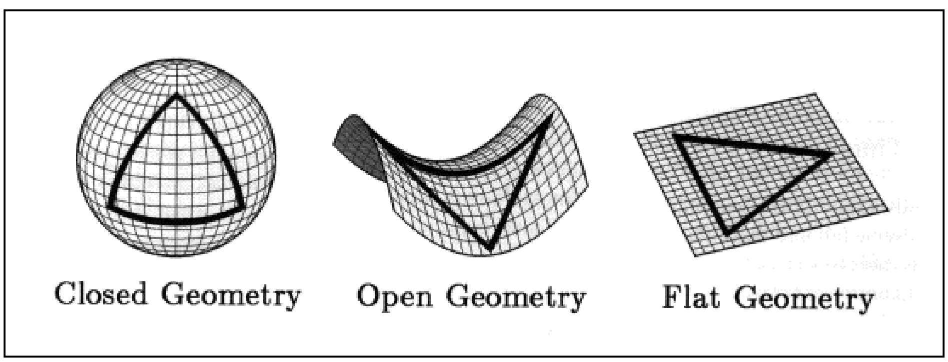


Figura 7. 13 – Representação das possíveis geometrias do Universo.

Uma das formas de identificação dessa geometria é simplesmente olhar os ângulos dos triângulos representados sobre as superfícies: geometrias fechadas ou esféricas tem a soma maior que 180°; geometrias abertas ou hiperbólicas tem a soma menor que 180° enquanto a plana, ou Euclidiana, é a que normalmente nos lembramos, em que a soma é igual a 180°.

A geometria define a dinâmica do Universo. Essa força depende da densidade média de matéria-energia no Universo. A densidade de matéria atual do Universo não é suficiente para interromper a expansão (= 0,27 Ω_0) e, pensando somente em termos de matéria, a geometria seria aberta e o Universo se expandiria para sempre. Entretanto, a densidade de energia escura, que funciona como uma pressão negativa e é responsável pela expansão acelerada do Universo, contribui para a densidade total, fazendo com que ela torne-se igual a 1.

Se a densidade total fosse maior que a densidade crítica, ρ_c, a expansão seria interrompida e o movimento se inverteria, conduzindo o Universo a um colapso, ou "BIG CRUNCH". Para valores menores que ρ_c a expansão aconteceria eternamente. O valor de ρ_c é facilmente calculado. Ele depende da inclinação da reta na Figura 7.6 e do valor da constante de gravitacional G. A melhor estimativa é que $\rho_c \sim 10^{-29}$ g.cm^{-3}.

Conforme discutimos anteriormente, toda a matéria que forma a nossa galáxia, outras galáxias e aglomerados pode ser estimada por meios dinâmicos, isto é, aplicando-se as leis de Newton e as leis de conservação de energia. Essa relação entre a energia cinética (que quantifica o movimento das galáxias) e a energia gravitacional (que "atrapalha" o movimento, tendendo a puxar as galáxias umas ao encontro das outras) é chamada de teorema do Virial. Por estudos dos resultados da aplicação do teorema do Virial, chegamos à conclusão que a quantidade de matéria escura no Universo é cerca de 10 vezes maior do que a quantidade de matéria normal.

Ao longo dessa monografia podemos ressaltar um fato notável: toda a dinâmica da evolução do Universo obedece a um delicado equilíbrio de forças, uma espécie de *"cabo de guerra"* entre a força da gravidade e diversas outras forças que, em diferentes épocas da vida de um sistema planetário, de uma estrela, de um aglomerado de galáxias, atuam contrabalançando a tendência da gravidade de atrair os corpos. Então, se imaginarmos que o Universo não tem matéria suficiente para interromper completamente o processo de expansão, o que vai acontecer com o passar do tempo?

Bom, estrelas se formam de nuvens de hidrogênio... daqui a muitos bilhões de anos, teremos a seguinte situação: todo o hidrogênio disponível para virar estrela terá sido consumido nas reações nucleares e os átomos que não foram consumidos então não terão mais como se agrupar para formar estrelas, porque a expansão terá separado as nuvens que são, naturalmente, o local onde acontece formação de estrelas. E as galáxias? Nas galáxias de campo, que se encontram sozinhas, as estrelas mais velhas já terão queimado todo o seu combustível e a galáxia apagará, porque não haverá mais formação estelar. As galáxias que se encontram em grupos e aglomerados, provavelmente entrarão em estado de equilíbrio gravitacional ou então se fundirão em um só objeto. O que acontece com as estrelas das galáxias de campo também acontecerá, mais cedo ou mais tarde, com as galáxias em grupos: elas "apagarão".

Juntando a isso as conseqüências da Segunda Lei da Termodinâmica, que diz que, sempre que acontece um evento irreversível no Universo, a entropia (que pode ser comparada ao grau de desorganização de um determinado sistema) permanece constante ou aumenta, caminhamos então para um estado em que não haverá mais energia disponível no Universo para que aconteçam eventos quaisquer. Além disso, após cerca de 10^{32} anos os constituintes básicos da matéria, feitas principalmente de prótons, devem decair, aumentando o campo de radiação e "decompondo" toda a matéria existente no Universo.

O Universo estará, então, no seu estado de energia mínima – onde não há como perturbá-los sem que mais energia seja introduzida – e entropia máxima, caminhando para seus momentos finais. Se não houver nenhum processo inesperado que modifique esse quadro (e que nem podemos imaginar direito qual seja), estaremos presenciando a morte térmica do Universo. Essa é uma das conseqüências naturais de um modelo de Universo que começa com um BIG BANG e cuja quantidade de matéria não é suficiente para interromper o processo de expansão.

Por outro lado, caso a densidade fosse maior do que ρ_c, e supondo que vivemos num Universo que começou com uma grande explosão, teríamos um instante (não sabemos exatamente quando) em que a expansão do Universo seria interrompida e ele começaria a se contrair. A gravidade puxaria então os corpos novamente uns de encontro aos outros e, seguindo as leis da Termodinâmica, a temperatura do Universo novamente aumentaria. Com a diminuição do volume e aumento gradual da densidade, teríamos uma contração acelerada e o final desse processo seria um "BIG CRUNCH", com o Universo voltando a uma singularidade e levando consigo todo o espaço-tempo. O quadro atual das observações praticamente descarta essa possibilidade, mas modelos cíclicos e estacionários ainda são estudados e tem um atrativo téorico interessante, que é justificar o processo de criação contínua de matéria.

Ainda não sabemos responder se as idéias sobre a morte térmica do Universo apresentadas acima acontecerão exatamente desse modo. As questões formuladas pelos cientistas que trabalham com a física de partículas se juntam às dos cosmólogos nessa tentativa de definir qual será o futuro do Universo que hoje observamos. Para terminar de montar o quadro, as respostas procuradas pela Cosmologia são cruciais, pois o valor da taxa de expansão do Universo, sua idade e composição química são essenciais para entender o quebra-cabeças cosmológico.

7.11 CONCLUSÃO

A Cosmologia é uma ciência que trabalha para tentar entender o conteúdo, estrutura e evolução do Universo, lidando com enormes tempos e distâncias. Ela tenta também entender como o Universo jovem se comportou sob condições extremas de densidade, temperatura e energia.

Teóricos, observadores e experimentalistas estão desenvolvendo uma grande variedade de técnicas e instrumentos para responder as questões fundamentais que levantamos ao longo desse capítulo. O progresso ao longo dos últimos 30 anos foi enorme, mas na década de 90, em particular, a Cosmologia tornou-se o que chamamos de ciência madura, dispondo de uma enorme quantidade de dados, informações diversas e teoria e instrumentação avançando rapidamente.

Observações recentes do satélite WMAP e de outros experimentos responderam algumas das questões sobre a história térmica e a evolução do Universo. Observações das estruturas em grande escala vêm sendo feitas por diversos grupos no mundo, usando dados de telescópios no solo e a bordo de satélites (Telescópio Hubble). Nosso conhecimento sobre a distribuição e movimento peculiar (causado pela distribuição de massa no Universo) das galáxias ainda é incompleto, mas já temos uma boa idéia do Universo que nos cerca e de suas propriedades físicas mais importantes. Uma nova geração de experimentos (telescópios gigantes, satélites e experimentos cuja tecnologia teve que ser desenvolvida especialmente para eles) estão fazendo ou planejam fazer novas medidas e estudar o Universo de formas inimagináveis há 25 anos atrás. Estimativas da idade do Universo e da quantidade de matéria escura estão em andamento, com o Telescópio Espacial Hubble, diversos levantamentos de objetos em diferentes comprimentos de onda (2MASS, 2dF, SDSS, SDOSS, SNI, objetos Lyman-α, etc.). O INPE participa ativamente em vários desses projetos, tanto para estudar a RCFM quanto no estudo de simulações de interação de galáxias.

Esperamos um enorme avanço no entendimento da evolução das galáxias e das estruturas em grande escala nesta década. Ainda não sabemos exatamente qual é a natureza da matéria escura ou da energia escura, mas certamente ambas são resíduos do Universo jovem. Vários experimentos estão em andamento para detectar ou eliminar candidatos, como os experimentos de neutrinos e WIMPS (Weak Interactive Massive Particles) KamLand, Edelweiss, Sudbury. O estudo da distribuição de supernovas tipo I distantes permite descrever a expansão acelerada do Universo e, em consequëncia, conhecer melhor as propriedades da energia escura.

Os problemas principais que a Cosmologia tenta resolver são bem formulados, mas muitas das soluções tem permanecido obscuras por décadas. Finalmente, com o aumento da quantidade de informações obtidas a partir do avanço dos experimentos, computadores e o conseqüente avanço da teoria, uma boa parte das questões fundamentais apresentadas nesse capítulo estão começando a ser resolvidas. Vários dos pesquisadores da DAS estão diretamente envolvidos nessa corrida ao conhecimento e estão trabalhando atentos aos novos resultados que, diariamente, aparecem na literatura científica. A primeira versão dessa monografia, escrita em 1998, continha diversas informações conflitantes com o conteúdo atual e algumas questões formuladas nas décadas de 80 e 90 que recentemente respondidas (mesmo que ainda sujeitas a confirmação) pelos resultados do satélite WMAP e dos levantamentos de objetos distantes. Se uma monografia sobre esse mesmo tema for escrita dentro de 10 ou 20 anos, temos certeza que ela será ainda mais distinta da escrita em 1998, no que diz respeito aos problemas fundamentais que a Cosmologia pretende resolver.

7.12 REFERÊNCIAS

Além da bibliografia em português e inglês consultada, incluo alguns outros textos que talvez despertem a atenção daqueles que tiveram uma formação em ciências exatas. Eles foram escolhidos com base pura e simplesmente no meu gosto pessoal, estando ordenadas por ordem crescente de dificuldade.

- “O despertar da Via Láctea”. Thimothy Ferris. Ed. Campus, 1990. Texto de divulgação, um pouco romanceado, mas que cobre de forma bastante fiel a história da astronomia, desde seus primórdios. O autor é um dos grandes jornalistas ligados à divulgação científica nos EUA.
- “A Brief History of Time”. Stephen Hawking. Um dos livros mais divulgados sobre Cosmologia, lamentavelmente muito mal traduzido para o português, sob o título “Uma breve história do tempo”. Texto muito interessante, por mostrar a visão de Universo de um dos grandes físicos da segunda metade do século XX.
- “Shadows of Creation: Dark Matter and the Structure of the Universe”. Michael Riordan e David Schramm. W. H. Freeman and Co., New York, 1991. Texto de divulgação científica, de um dos especialistas em nucleossíntese primordial, busca transmitir os conceitos básicos do processo de formação de estruturas e da existência de matéria escura no Universo.
- “A radiação cósmica de fundo e a formação de estrutura em larga escala no Universo: uma visão atual”. Carlos Alexandre Wuensche. Revista *Humanidades*, **38**:142-151, 1994. Ensaio sobre o problema da formação de estruturas no Universo, escrito para uma revista basicamente voltada para um público de ciências humanas.
- “Os Três Primeiros Minutos”. Steven Weinberg. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980. Escrito por um físico de partículas que se aventurou no terreno da

Cosmologia, esse texto apresenta, numa linguagem clara e simples, um resumo do Universo primordial. Um dos primeiros textos de divulgação escrito sobre Cosmologia (1977), com um apêndice matemático relativamente simples...

- "O Big Bang". Joseph Silk. Editora UnB, 2a. ed., 1989. Um dos papas da área, Joseph Silk apresenta o modelo do Big Bang de forma simples, e introduz alguns conceitos matemáticos, também concentrados em um apêndice, um pouco mais complexos que os apresentados no livro de Weinberg.
- "Cosmology: a research briefing". National Science Foundation – Board on Physics and Astronomy. National Academic Press, 1995. Um texto escrito pelo comitê assessor de uma das agências financiadoras da pesquisa básica nos EUA, sugerindo as diretrizes a serem seguidas no séc. XXI e os principais problemas a serem atacados em astrofísica e cosmologia. Escrito para não especialistas, é uma excelente introdução aos problemas atuais.
- "The Physical Universe". Frank Shu. University Science Books, 1982. Livro texto adotado em diversas universidades americanas, em geral usado para apresentar um curso de um ano em astronomia para alunos que não vão seguir a carreira científica.
- ASTRONOMIA: Uma Visão Geral do Universo. Orgs. Amâncio Friaça, Elisabete Dal Pino, Laerte Sodré, Jr. e Vera Jatenco-Pereira, EDUSP, 2000.
- Revistas "Scientific American Brasil" e "Ciência Hoje". Existem diversos artigos ligados à formação do Universo e à interação entre galáxias. Vale a pena pesquisar.
- "Foundations of Astronomy". Michael Seeds. Wadsworth Publising Co., 1997. Livro texto de introdução à astronomia, com textos claros e excelentes ilustrações. Menos técnico e mais bem ilustrado que o "The Physical Universe".
- "O Universo inflacionário". Alan Guth. Editora Campus, 1997. Um texto claro e instigante, escrito por um dos pais do modelo inflacionário.

Capítulo 8

PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

Thyrso Villela Neto*

* e-mail: villela@das.inpe.br

PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

8.1 INTRODUÇÃO

A Astrofísica é uma das atividades científicas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que podem representar de forma mais direta o nome do Instituto. Afinal, seu objeto de estudo é o espaço! Suas áreas de estudo abrangem as mais distantes fronteiras que podem ser vislumbradas pelo ser humano, tanto em tempo quanto em espaço. Historicamente, a origem da pesquisa em Astrofísica no INPE está ligada ao desenvolvimento da Ciência Espacial no Instituto. A Ciência Espacial foi a área da qual se originou todo o INPE. Inicialmente, o objetivo era estudar o espaço circunvizinho à Terra. Mais tarde, esse campo de estudo foi ampliado, passando a abranger o espaço exterior. Para tanto, houve a necessidade de desenvolver instrumentos que fizessem observações no espaço, a bordo de balões, foguetes e satélites, já que a atmosfera terrestre absorve grande parte dos sinais que vêm do espaço.

As pesquisas em Astrofísica no INPE começaram na década de sessenta e vêm se desenvolvendo desde então, com alguns ajustes sendo feitos nesse período. As primeiras pesquisas relacionavam-se com a Astrofísica de Altas Energias, que tem como objetivo de estudo entender os mecanismos físicos responsáveis pelas emissões de raios-X e gama oriundas de objetos cósmicos, como pulsares, estrelas binárias, galáxias, etc. Mais tarde, houve o desenvolvimento de estudos na área de radioastronomia, com a incorporação pelo INPE do Radiobservatório do Itapetinga, em Atibaia. Em meados da década de oitenta, iniciaram-se os estudos relacionados com as observações na faixa óptica do espectro eletromagnético, com a vinda de um grupo de pesquisadores que atuam nessa área.

A Astrofísica estuda os objetos e as estruturas que formam o Universo em que vivemos. Estamos acostumados a ouvir falar do meio ambiente que nos cerca e a Astrofísica nada mais faz do que estudar o meio ambiente em que a Terra está inserida. Portanto, assim como é importante conhecer os rios, as montanhas, os vales e o clima que nos cercam, também é muito importante conhecer as estrelas, planetas, galáxias e cometas. Por isso, realizar pesquisas em Astrofísica significa também conhecer o nosso

meio ambiente. É conveniente lembrar que o meio ambiente é o conjunto dos fatores externos que podem influir na vida biológica, social ou cultural de um indivíduo ou grupo; o espaço externo à Terra é um dos fatores que influenciam diretamente a vida na Terra. Portanto, devemos conhecê-lo da melhor forma possível.

O Sol, que é uma estrela, é o componente da natureza que mais diretamente afeta a vida na Terra. É ele quem define o regime de temperaturas no nosso planeta. O Sol também é o responsável pelos ciclos de vida das diversas espécies da Terra, definindo, por exemplo, a fotossíntese. Pode ter também efeitos indesejáveis, como a interferência nas telecomunicações e no aumento da incidência de câncer de pele no ser humano. Dessa forma, é mais do que evidente que devemos entender muito bem como o Sol se comporta para que possamos nos precaver de possíveis problemas.

A Astrofísica pode também contribuir para a preservação da vida na Terra, seja por meio de previsão de catástrofes, como possíveis choques de cometas ou asteróides de grandes proporções com a Terra, seja por meio de estudos que possibilitem a colonização de outros planetas por seres humanos no futuro. O nosso planeta corre o risco de ser bombardeado por algum corpo que esteja vagando pelo espaço, como aconteceu recentemente com Júpiter, e sofrer graves conseqüências, entre elas a extinção da espécie humana. Supõe-se que no passado algo semelhante tenha ocorrido aqui na Terra e tenha provocado o desaparecimento de várias espécies, entre elas a dos dinossauros. As pesquisas astronômicas podem ajudar na previsão de catástrofes como essas e permitir que medidas sejam tomadas com antecedência para evitá-las ou minimizá-las. Uma outra contribuição, e das mais importantes, da Astrofísica foi a de desmistificar crendices que, infelizmente, persistem até os dias de hoje, como a astrologia.

Os estudos em Astrofísica podem trazer benefícios diretos à sociedade e fornecer dados para que problemas de outras áreas possam vir a ser resolvidos. Hoje em dia, por exemplo, a Física de Partículas, que procura entender como a matéria é formada, precisa construir aceleradores de partículas de altíssimas energias. Infelizmente, isso não é tão simples assim, já que envolve sérios problemas tecnológicos e financeiros. No entanto, o Universo está repleto de regiões onde há energia suficiente

para acelerar partículas a velocidades altíssimas. Pela observação dessas regiões e dos fenômenos que lá ocorrem, pode-se aprender muito sobre as coisas que acontecem aqui na Terra.

De uma forma geral, pode-se até questionar o porquê de se investir tempo e dinheiro em pesquisas relacionadas à Astrofísica num país como o Brasil. Afinal, o Brasil não é um país no qual os recursos financeiros sejam abundantes e ainda há muita coisa que precisa ser feita no campo social. No entanto, deve-se ter em mente que um país deve tentar dominar o maior número possível de temas ligados ao conhecimento humano, já que o bem-estar de seu povo está intimamente ligado ao grau de conhecimento que o país possui. O conhecimento é a arma mais poderosa para o desenvolvimento econômico e social.

Apenas como exemplos, podem ser citados os casos de alguns produtos que foram desenvolvidos ou aperfeiçoados graças aos investimentos feitos em pesquisas em Astrofísica e que hoje rendem dividendos para os detentores dessas tecnologias: as câmaras de vídeo com base no CCD ("charge coupled device"), como as de uso profissional ou doméstico, os aparelhos de tomografia computadorizada utilizados em medicina, os sistemas de inspeção de bagagens em aeroportos com "scanners" de raios-X, vários sistemas de microondas utilizados em telefonia celular, etc. Outro exemplo de aplicação prática dos conhecimentos proporcionados pela Astrofísica está na Meteorologia, que se valeu de estudos acerca da atmosfera de planetas para melhorar os modelos sobre o comportamento da atmosfera terrestre.

Além desses exemplos, pode ser citado ainda o enorme potencial que a Astrofísica tem de tentar responder a um dos maiores anseios do ser humano, que é o de entender o Universo em que vive e saber mais sobre esse meio ambiente que o cerca. Como vimos, o estudo da Astrofísica não se resume apenas à poesia que o tema suscita, mas induz e permite a solução de vários problemas cruciais para a sociedade.

As pesquisas em Astronomia e Astrofísica realizadas pelo INPE estão concentradas na Divisão de Astrofísica (DAS), que é uma das três divisões científicas da Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do INPE. O

objetivo dessas pesquisas é entender os fenômenos que ocorrem no Universo de um modo geral. Busca-se conhecer as causas desses fenômenos e entender a Física que governa os objetos que são vistos no céu, como estrelas, galáxias, quasares, buracos negros, entre outros.

A DAS tem 29 funcionários, dos quais 16 são pesquisadores que se dedicam a alguns dos temas de domínio da Astrofísica, em cujos estudos são utilizadas observações em diversas faixas do espectro eletromagnético (da Radioastronomia à Astrofísica de Raios Gama) ou a detecção de partículas, como os raios cósmicos (prótons, elétrons e íons). Além disso, há estudos concentrados na detecção e análise de ondas gravitacionais, que deverão se tornar uma nova ferramenta para a observação do Universo. Desses 16 pesquisadores, 15 são doutores e um é mestre. A DAS conta ainda com 3 engenheiros eletrônicos, 1 especialista em óptica e 8 técnicos ligados diretamente ao trabalho de desenvolvimento de experimentos para a pesquisa em Astrofísica, e que atuam nas área de mecânica, eletrônica e computação, e uma secretária. A DAS tem laboratórios equipados para propiciar o desenvolvimento de instrumentação científica nas áreas de microondas, rádio, óptica, raios X, raios gama, raios cósmicos e ondas gravitacionais.

Tradicionalmente, a DAS tenta desenvolver pesquisas que necessitam de observações com instrumentos que ainda não estão disponíveis no País, de forma a estimular o desenvolvimento de instrumentação científica no Brasil e a formação de pessoal altamente qualificado. Isso se deve ao fato de o INPE possuir uma boa infraestrutura para esse tipo de atividade, que muitas vezes não é encontrada nas universidades ou em outros centros de pesquisa. Em particular, as atividades ligadas ao desenvolvimento de instrumentação espacial, com experimentos a bordo de balões, foguetes e satélites, têm o seu lugar natural no INPE, que é o maior órgão civil na área espacial no Brasil. Como conseqüência direta dessa iniciativa, há o engajamento de empresas brasileiras em projetos de alto teor tecnológico, o que contribui para a geração de empregos no País e para a melhoria da qualidade dos serviços e produtos dessas empresas.

Atrelado à sua atuação técnico-científica, o INPE mantém um curso de pós-

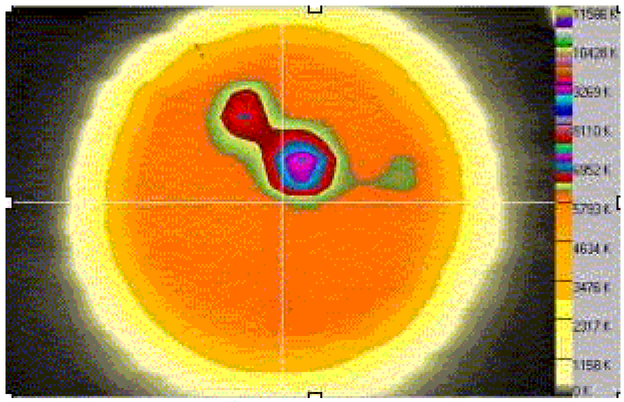
graduação com mestrado e doutorado em Astrofísica. Os temas das dissertações e teses são ligados às pesquisas desenvolvidas na Divisão. A Divisão de Astrofísica possui uma rede de estações de trabalho e de microcomputadores instalados com os principais títulos de “software” de uso da comunidade astronômica internacional para a redução e análise de dados e preparação de trabalhos na área. Esses computadores são utilizados pelos pesquisadores e estudantes (de iniciação científica, mestrado e doutorado) para pesquisa e atividades acadêmicas. O INPE possui um centro de computação, uma biblioteca especializada, com mais de 70.000 volumes e 1.500 assinaturas de revistas científicas, e mantém um Setor de Lançamento de Balões à disposição da comunidade científica nacional e internacional para a realização de experimentos que envolvam a necessidade de utilização de balões estratosféricos.

8.2 AS PESQUISAS EM ASTROFÍSICA NO INPE

A pesquisa na DAS está dividida, formalmente, em 5 linhas de pesquisa, embora essa divisão seja permeada pela atuação e interação de pesquisadores em diferentes linhas. Quatro dessas linhas de pesquisa são compostas exclusivamente por pesquisadores da DAS, enquanto uma é composta por membros DAS e das outras duas divisões da CEA (Geofísica Espacial e Aeronomia). As cinco linhas de pesquisa estão assim distribuídas: Astrofísica de Altas Energias, com 3 pesquisadores, Astrofísica Óptica e do Infravermelho, com 6 pesquisadores; Cosmologia e Gravitação, com 3 pesquisadores; Radioastrofísica Molecular, com 2 pesquisadores; Física do Meio Interplanetário, com 2 pesquisadores. Essas linhas contam com a participação de estudantes de pós-graduação (mestrado e doutorado), de iniciação científica, bolsistas de pós-doutoramento e pesquisadores visitantes.

8.2.1 MEIO INTERPLANETÁRIO E FÍSICA SOLAR

Em Física do Meio Interplanetário e Solar são estudados os mecanismos físicos referentes às questões fundamentais ligadas às explosões solares, à propagação dos efeitos desses fenômenos pelo meio interplanetário e à sua influência na magnetosfera



terrestre. Em particular, no Sol são investigados os processos de armazenamento da energia que é posteriormente liberada nessas explosões, o mecanismo que desencadeia a liberação dessa energia e que dá início ao fenômeno e os meios para prever a ocorrência dessas explosões. Essas investigações são feitas por meio de observações em várias regiões do espectro eletromagnético, utilizando sistemas receptores em rádio nas bandas decimétrica e milimétrica, em conjunto com outros observatórios internacionais, e com dados em raios X obtidos com experimentos a bordo de satélites. Desenvolve-se instrumentação na bandas rádio decimétrica e milimétrica. A figura acima mostra um mapa do Sol registrado na frequência de 22 GHz (22 bilhões de hertz). Os contornos no interior do disco solar indicam a posição de regiões ativas, os locais onde ocorrem as explosões solares.

8.2.2 ESTRELAS

O estudo de objetos como estrelas ou sistemas binários individuais, ou mesmo de configurações mais complexas como jatos ou anéis e cascas de gás ou poeira, propicia uma grande quantidade de informações a respeito da estrutura, evolução e processo de formação estelar. Naturalmente, há o interesse de coletar informações ao longo da faixa mais ampla possível do espectro eletromagnético. Dessa forma, na DAS são utilizadas observações que vão desde o infravermelho até os raios gama para obter as informações desejadas.

No infravermelho próximo, faixa do espectro na qual o meio interestelar e circunstelar é muito mais transparente, realizam-se estudos de regiões de formação estelar cercadas de poeira e também estudos de objetos relativamente frios, como é o caso das estrelas secundárias em binárias cataclísmicas. No óptico realiza-se uma gama de programas observacionais que vão desde o estudo polarimétrico de objetos

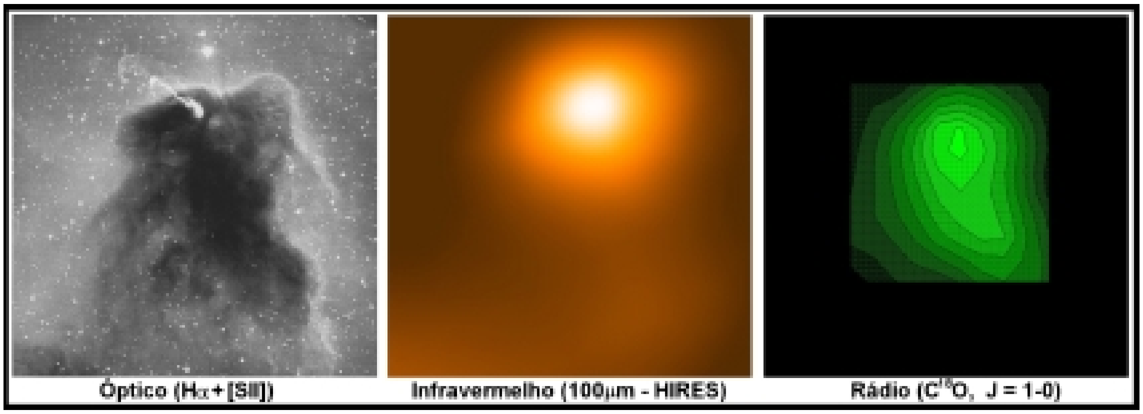
quentes ou objetos em estados evolutivos raros (por exemplo, PDS465), até às propriedades de classes de objetos, como variáveis irregulares. A fotometria CCD, e em particular a instrumentação e as técnicas de análise de fotometria diferencial rápida com CCDs, permite ainda o estudo de objetos que emitem radiação pulsada, como é o caso de V2116 Oph ou da parte óptica de certas fontes que apresentam transientes em raios-X. O estudo de estrelas e objetos isolados na DAS terá um grande impacto com a participação da Divisão na construção do imageador Spartan para o telescópio SOAR.

8.2.3 MEIO INTERESTELAR

A linha de pesquisa que trata da Radiofísica Molecular e do Meio Interestelar investiga tanto a emissão na faixa de rádio de linhas moleculares em nebulosas da Via Láctea, quanto a emissão de água em outras galáxias. Essas investigações estão voltadas basicamente para as regiões de formação de estrelas e têm como objetivo entender as condições físicas das nuvens de gás e poeira a partir das quais nascem as estrelas. Visando obter mais informações sobre as condições iniciais no processo de formação estelar, também é observada e analisada a emissão contínua dessas nebulosas na faixa do infravermelho.

A figura abaixo mostra três aspectos do glóbulo cometário S111, que se encontra na constelação de Vela. Glóbulos cometários são as menores e mais densas nuvens escuras do meio interestelar e são excelentes "laboratórios" para a análise da formação de estrelas de pequena massa, como o Sol. O quadro à esquerda mostra o aspecto aproximado desses objetos no óptico, sendo notórios os jatos estelares (prolongamentos brilhantes no alto da nuvem) decorrentes do processo de acréscimo de matéria da nuvem por parte da estrela em formação. O quadro do meio mostra o aspecto no infravermelho distante (100 micra), que indica basicamente a emissão de poeira a temperaturas moderadas (20 a 50 K). A estrela jovem, ainda embebida no glóbulo, aparece como fonte puntiforme. Por fim, o quadro à direita mostra a emissão do gás nas partes de maior densidade colunar do glóbulo, através de uma transição da molécula de $C^{18}O$.

Note que a estrela jovem está ligeiramente deslocada da região mais densa, que provavelmente foi seu lugar de nascimento.



Estudos das linhas espectrais de água e monóxido de silício também têm sido realizados em estrelas nos estágios finais de sua evolução, tendo como objetivo entender os processos dinâmicos das regiões onde essas emissões são geradas. As principais substâncias químicas estudadas nessas pesquisas são H_20 e SiO, que produzem emissão “maser” (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), e as moléculas NH_3, CS e CO, por meio de sua emissão térmica. Nessa linha de pesquisa também é desenvolvida instrumentação associada a espectrógrafos do tipo acústico-óptico e receptores criogênicos. Essas pesquisas têm sido efetuadas no Radiobservatório do Itapetinga e em cooperação com observatórios internacionais.

8.2.4 PULSARES E BURACOS NEGROS

São realizados estudos sobre os mecanismos pelos quais algumas classes de objetos astrofísicos, tais como estrelas binárias de raios-X, pulsares, núcleos ativos de galáxias e buracos negros, constituem-se em fontes de emissão de radiação eletromagnética de altas energias (raios-X e gama). Essas fontes estão em geral associadas a objetos que sofreram colapso no final de suas vidas, tais como estrelas anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros. São temas correntes da pesquisa em altas energias no INPE os estudos de pulsares de raios X e de estrelas variáveis cataclísmicas.

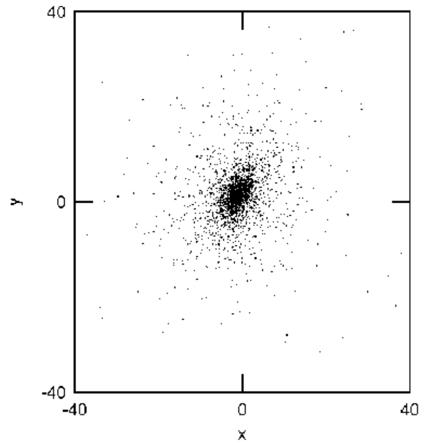
As técnicas experimentais utilizadas envolvem observações dessas fontes por meio de detectores de radiação X e gama que são colocados a bordo de balões estratosféricos. O desenvolvimento de novos detectores, bem como de técnicas de detecção e de imageamento no domínio de raios X e gama, são esforços permanentes do INPE. São feitas também observações com telescópios ópticos de forma a complementar as informações obtidas em raios X e gama.

Pulsares e buracos negros são objetos cósmicos altamente intrigantes dadas as suas características singulares. Entender a Física responsável pela formação desses objetos pode ter desdobramentos enormes para outros ramos da ciência. Muito ainda precisa ser feito para que se possa entender em detalhes os mecanismos físicos responsáveis pela emissão eletromagnética de pulsares e buracos negros e a DAS tem contribuído bastante nesse sentido com a determinação de vários parâmetros que identificam esses objetos.

8.2.5 GALÁXIAS

Estudam-se as condições físicas reinantes nas galáxias e nas grandes estruturas por elas formadas, os aglomerados, e a sua origem e evolução em escalas de tempo cosmológicas. São realizados estudos, teóricos e observacionais, da dinâmica e evolução química de galáxias normais, assim como de galáxias que apresentam atividade peculiar (quasares e núcleos ativos de galáxias). Simulações numéricas de encontros e colapsos de galáxias também constituem tema de pesquisa nesta área.





Na figura acima são mostradas, à esquerda, uma imagem da galáxia elíptica M59, e, à direita, uma simulação computacional que reproduz as propriedades observadas neste tipo de galáxia (tamanho, brilho e velocidade das estrelas que a compõem).

A fotometria e a espectroscopia no visível, em telescópios brasileiros ou no exterior, constituem a principal fonte de dados nesses estudos. É desenvolvida instrumentação óptica eficiente e competitiva que é utilizada nos telescópios brasileiros.

8.2.6 RAIOS CÓSMICOS

Na pesquisa relacionada aos raios cósmicos, o objetivo é estudar as diferentes partículas que atingem a Terra vindas do espaço exterior, como prótons, elétrons e íons. Em particular, estudam-se as partículas aprisionadas nos cinturões de radiação que envolvem a Terra. Essas partículas são aprisionadas ao redor da Terra devido à influência do campo magnético terrestre. Elas são provenientes de várias regiões e fontes do Universo, desde as mais próximas, como o Sol, até as mais longínquas, como os meios interestelar e intergaláctico. Conhecendo as características dessas partículas, como energia e densidade numérica, pode-se conseguir várias informações sobre as regiões de onde elas foram geradas.

8.2.7 COSMOLOGIA

Em Cosmologia, a ênfase é dada ao estudo da Radiação Cósmica de Fundo em microondas (~ -270° C), em microondas, originária do *Big Bang*, a grande explosão da qual o Universo se originou, principalmente nos aspectos relacionados à sua distribuição espacial, que fornecem informações a respeito do processo de formação das estruturas que observamos no céu, como galáxias e aglomerados de galáxias. São realizadas observações com detectores de microondas e infravermelho embarcados em balões estratosféricos e satélites. Está sendo desenvolvido atualmente um experimento, em conjunto com instituições no exterior, capaz de obter dados que complementem os obtidos pelo satélite COBE. Esse instrumento fará vôos a bordo de balões estratosféricos por mais de 100 dias ao redor da Terra. São feitas também observações da emissão rádio da nossa galáxia com o objetivo de conhecer o grau de contaminação desse sinal nas medidas da Radiação de Fundo.

8.3 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A pesquisa em Astrofísica visa entender a origem, evolução e destino do Universo e de seus componentes. Para isso é necessário obter dados ao longo de todo o espectro eletromagnético e mesmo fora dele, quando consideramos as ondas gravitacionais e as partículas de origem cósmica. Dessa forma, são utilizados instrumentos que operam no solo, como telescópios ópticos e radiotelescópios, e instrumentos no espaço, tais como telescópios e experimentos embarcados em balões, foguetes e satélites. Os pesquisadores da DAS utilizam-se praticamente de todo o arsenal de instrumentação disponível hoje em dia para coletar os dados relevantes para suas pesquisas.

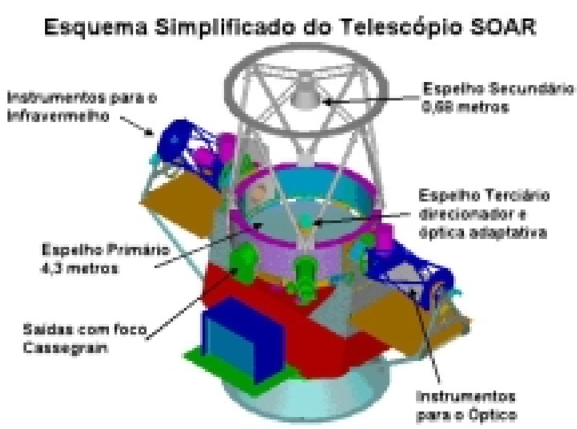
8.3.1 INSTRUMENTOS NO SOLO

8.3.1.1 TELESCÓPIOS ÓPTICOS:



Os dados na região óptica e do infravermelho próximo são coletados pelos pesquisadores da DAS utilizando principalmente os telescópios do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Esses telescópios estão instalados no sul de Minas Gerais, a 1864 m de altitude, no Pico dos Dias, município de Brazópolis. Diversas informações adicionais podem ser obtidas no "site" do LNA (www.lna.br). A figura ao lado mostra o principal telescópio do LNA. Trata-se de um refletor com espelho primário de 1,6 metros de diâmetro e configuração com focos Cassegrain e Coudé. O LNA possui ainda dois telescópios menores, de 60 cm de diâmetro, que são utilizados principalmente para fotometria.

Os pesquisadores da DAS utilizam também os telescópios de 8 metros do Projeto Gemini (ver www.gemini.edu), porém em condições restritas, uma vez que a comunidade brasileira dispõe de apenas 8 noites/ano nesses instrumentos. A partir de 2002 terá início a operação do telescópio SOAR (*Southern Observatory for Astrophysical Research*) de 4 metros de diâmetro (figura abaixo). Estima-se que os pesquisadores da DAS venham a utilizar o SOAR durante 15-20 noites/ano.



A DAS tem tido uma participação importante no desenvolvimento e/ou introdução de novos instrumentos para uso com os telescópios do LNA. Tal foi o caso da primeira câmara CCD criogênica, em 1987, no desenvolvimento do fotômetro rápido FOTRAP (em funcionamento há mais de 12 anos), no desenvolvimento do fotômetro rápido CCD e no projeto da Câmara Infravermelho (CamIV).

A CamIV está operando no LNA desde março de 1999 e foi construída com recursos do Pronex/IAG-USP gerenciados por pessoal da DAS. Trata-se de um imageador baseado no detetor HAWAII de 1024 × 1024 pixels, sensível na faixa 0,8 a 2,5 micra e refrigerado a nitrogênio líquido. O detetor pode ser utilizado no espectrógrafo Coudé fornecendo resoluções espectrais da ordem de 10000. No modo imageamento direto a CamIV produz um dos maiores campos de visada disponíveis para instrumentos dessa classe no Hemisfério Sul (8 × 8 minutos de arco).



A imagem ao lado mostra a grande Nebulosa de Órion, a partir de uma composição de imagens tomadas nas bandas J, H e K do infravermelho próximo. Como o Universo é muito mais transparente nesses comprimentos de onda, o instrumento é particularmente adequado para estudos de regiões de formação de estrelas (como em Órion) ou de regiões altamente obscurecidas pela poeira existente no plano galáctico.

Vários detalhes técnicos e resultados científicos da utilização da CamIV podem ser vistos na internet acessando http://www.das.inpe.br/~chico/NIR/chnir.htm

8.3.1.2 RADIOTELESCÓPIOS

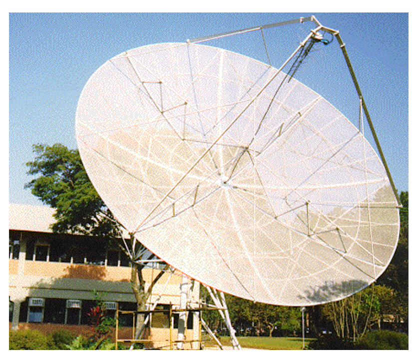
- *ROI*



O Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), situado numa área de 3 alqueires dentro do município de Atibaia, SP, é o local onde se encontra a maior instalação destinada à radioastronomia no Brasil. Em funcionamento desde o início da década de setenta, é operado hoje pelo INPE e está à disposição de toda a comunidade científica nacional. Possui uma antena de 13,7 m de diâmetro capaz de receber sinais de freqüência entre 1 e 150 GHz. São realizadas várias pesquisas astronômicas, incluindo as relacionadas a Física Solar, formação de estrelas, astronomia galáctica e extragaláctica. Na figura acima, é mostrada uma fotografia da redoma que envolve esse instrumento, protegendo-o de chuvas, ventos e outras variações climáticas.

- *ESPECTRÓGRAFO SOLAR BRASILEIRO*

O instrumento opera com uma antena de 9m de diâmetro (figura abaixo), que se encontra instalada na unidade do INPE de São José dos Campos, e é dedicado à observação da atividade solar em ondas de rádio decimétricas. Encontram-se instalados um espectrógrafo decimétrico de banda larga (200-2500 MHz), de alta sensibilidade e resolução, que fornece dados aos pesquisadores sobre as explosões solares. Encontra-se também em operação um receptor de freqüência variável (18-23 GHz), um espectrômetro decimétrico de banda estreita com alta resolução temporal e espectral e um espectrômetro digital decimétrico de alta resolução e banda larga. Encontra-se em fase de desenvolvimento um espectrômetro milimétrico de freqüência variável. Esta antena está em operação há alguns anos.



- *GEM*

O radiotelescópio GEM (do inglês *Galactic Emission Mapping* – Mapeamento da Emissão Galáctica) é fruto um projeto desenvolvido dentro de uma colaboração



internacional envolvendo pesquisadores da DAS e instituições dos Estados Unidos da América, Itália e Colômbia. Trata-se de uma antena de 5,5 m de diâmetro (mostrada na figura ao lado) capaz de operar com receptores rádio entre 400 MHz e 10 GHz. O objetivo é fazer um levantamento em forma de mapas de todo o céu em algumas freqüências de rádio. É um instrumento dedicado a essa pesquisa e que opera 24 horas por dia durante todos os dias do ano obtendo dados. Naturalmente, são realizadas manutenções periódicas no instrumento e também realizadas viagens para instalá-lo em diversas localidades ao redor do globo terrestre. Esse instrumento já realizou observações nos Estados Unidos, na Colômbia, nas Ilhas Canárias, Espanha, no Pólo Sul, e está agora no Brasil, instalada no campus do INPE em Cachoeira Paulista, SP, onde deve operar por alguns anos.

8.3.1.3 OBSERVATÓRIO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

O Projeto Gráviton é um esforço de cientistas brasileiros de diversas instituições (INPE, USP, UNICAMP, CBPF/LAFEX) para construir uma antena gravitacional ressonante capaz de observar sinais gravitacionais oriundos de fontes astrofísicas. A primeira detecção de ondas gravitacionais terá um impacto extraordinário na pesquisa em Física, não só porque confirmará uma previsão fundamental da Teoria da Relatividade Geral e testará várias teorias de gravitação, mas também porque representará a abertura de uma nova "janela" para estudar o Universo, permitindo observar fenômenos que seriam impossíveis de ser observados no espectro eletromagnético. A Antena Schenberg consistirá em uma esfera maciça, com 65 centímetros de diâmetro, feita de uma liga cobre-alumínio pesando 1150 kg. O telessensor será capaz de converter a energia das ondas gravitacionais em impulsos elétricos que serão amplificados por dispositivos supercondutores, digitalizados e,

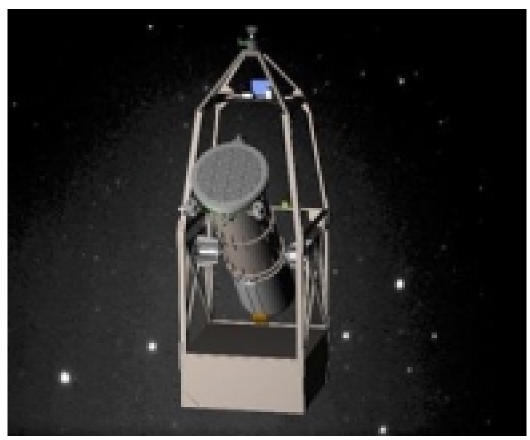
então, processados e analisados computacionalmente. Para minimizar ruídos externos o detector terá que ser mantido sob alto vácuo e refrigerado a temperaturas ultrabaixas, de ordem de 0,02 kelvin (ou - 273,14° C). A sensibilidade com que essa antena operará vai permitir detectar uma explosão de supernova ou o choque de duas estrelas compactas, que originalmente orbitassem entre si, se estes eventos ocorrerem até uma distância de 2 Mpc (7 milhões de anos luz). Isto inclui o Grupo Local de galáxias.

8.3.2 INSTRUMENTOS NO ESPAÇO

8.3.2.1 BALÕES

- *MASCO*

O Projeto MASCO tem como objetivo construir um telescópio que seja capaz de produzir imagens em raios X e gama de várias regiões do Universo. As emissões cósmicas nessas faixas de freqüências só podem ser observadas a grandes altitudes, por causa da absorção da atmosfera terrestre. Para realizar essas observações, o telescópio será colocado a bordo de uma plataforma que será suspensa por um balão plástico cheio de hidrogênio. As observações serão realizadas a aproximadamente 42 km de altitude. O diâmetro do balão quando estiver totalmente inflado será superior a 100 m, o que equivale ao comprimento de um campo de futebol. Muitas vezes esses balões voam a mais de 120 km/h, o que exige que os sistema de controle de apontamento e estabilização em vôo seja altamente eficiente para manter o telescópio apontando para um alvo no céu independentemente do movimento do balão. A técnica utilizada para obter as imagens em raios-X e gama é conhecida como "**más**cara **co**dificada", daí o nome do projeto, que se originou das duas primeiras sílabas das palavras que formam o nome da técnica de imageamento empregada neste instrumento. O experimento, mostrado na figura acima, tem aproximadamente 7 m de



altura e pesa aproximadamente 2000 kg.

- *ACE*



O projeto ACE (*Advanced Cosmic Explorer*), uma cooperação científica entre a DAS, a Universidade da Califórnia, Santa Bárbara (EUA), a Escola de Engenharia de Itajubá, e o Jet Propulsion Lab (EUA), é um experimento concebido para estudar a distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo em microondas em escalas angulares entre 0,15° e 10°. Ele será capaz de gerar um conjunto de mapas do céu na faixa de comprimentos de onda milimétricos (entre 25 e 100 GHz) com uma resolução melhor que 1°. O ACE é um projeto a ser lançado em balão estratosférico em vôos de longa duração (t > 100 dias). Ele será montado sobre uma plataforma estabilizada, sendo o conjunto gôndola-sistema óptico construído utilizando-se materiais compostos, o que tornará toda a estrutura extremamente leve. Versões antigas utilizaram espelhos comuns, do mesmo tipo empregado para medidas em microondas. Entretanto, no caso do ACE (mostrado em posição de lançamento a bordo de balão estratosférico na figura ao lado), o peso a ser carregado pelo balão estratosférico é um fator crítico. O projeto consistirá em quatro vôos de diferentes latitudes (sendo um do Brasil), cobrindo cerca de 75% do céu com a melhor combinação de resolução angular e sensibilidade já conseguida.

8.3.2.2 SATÉLITES

- *SAC-B*

O *Satélite de Aplicaciones Científicas* (SAC-B) foi um experimento de colaboração entre instituições científicas da Argentina, da Itália, dos EUA e o INPE, com a finalidade de estudar a emissão de raios-X do Sol. Foi o primeiro satélite construído pela Argentina e foi totalmente testado no INPE, tendo a participação de pesquisadores da DAS. Infelizmente, devido a uma falha do foguete Pegasus dos EUA, o satélite foi

perdido depois do lançamento, no final de 1996. De qualquer forma, os testes realizados pelo INPE mostraram que há domínio tecnológico no Brasil para testar com sucesso experimentos científicos espaciais.

- *SACI – 1*

O primeiro microssatélite brasileiro, SACI –1 (**Sa**télite **Ci**entífico) levou a bordo vários pequenos experimentos, dentre eles um experimento que contava com a participação de pesquisadores da DAS. Tratava-se do experimento ORCAS (**O**bservações de **R**aios **C**ósmicos **A**nômalos e **S**olares na Magnetosfera) que tinha a missão de monitorar a concentração e o fluxo de partículas como elétrons, Hélio, Neônio e Lítio na magnetosfera terrestre. O experimento ORCAS era dotado de dois telescópios, um secundário, denominado PRE, e um principal, denominado MAIN, capazes de observar o fluxo e o espectro dessas partículas, além da variação temporal de ambos durante as diferentes atividades solares. O experimento ORCAS foi o resultado de uma colaboração científica entre o INPE e instituições de pesquisa dos EUA e Japão. Infelizmente, o satélite apresentou falhas e os experimentos a bordo ficaram comprometidos.

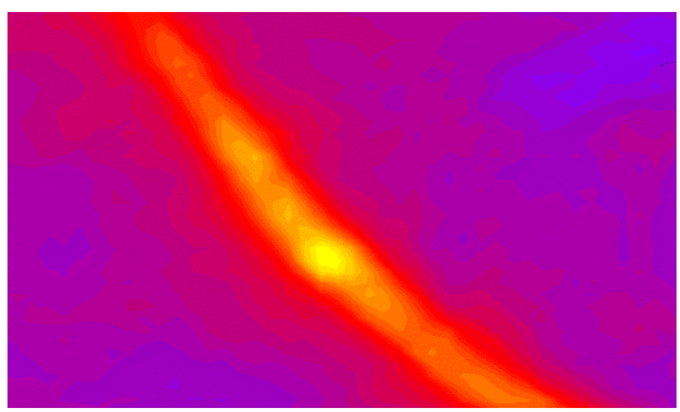
- *MIRAX*

O novo programa de satélites científicos do INPE prevê o desenvolvimento de 3 satélites científicos, dedicados às áreas de Geomagnetismo, Aeronomia e Astrofísica. O conceito de uma câmera imageadora de raios-X foi selecionado para ser o principal experimento do satélite astrofísico desse programa. O experimento é um Monitor e Imageador de Raios-X Duros (MIRAX), constituído basicamente de um detector de última geração composto por uma liga de uma telureto de Cádmio e telureto de Zinco (CZT) com resolução espacial de 0,5 mm, 164 cm^2 de área e alta eficiência fotoelétrica até 200 keV, separado de 78 cm de uma máscara codificada de tungstênio de 0,5 mm de espessura, composta por uma repetição 2x2 de um padrão MURA (“Modified Uniformly Redundant Array'” -- Arranjo Uniformemente Redundante Modificado) com elementos de 1,3 mm de lado. Essa configuração permite a obtenção de imagens

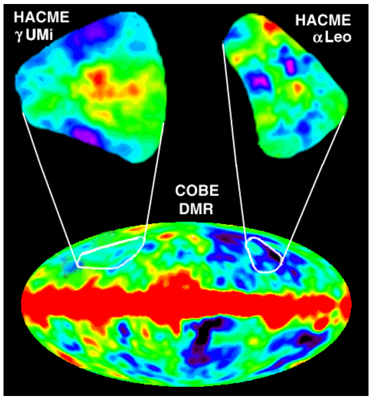
astrofísicas com resolução angular de ~ 6 minutos de arco num campo de visada de 38 x 38 graus. A massa do instrumento será de aproximadamente 50 kg e o consumo será de ~ 50 W. O instrumento será acomodado numa plataforma de satélite de 120 kg e terá dimensões compatíveis com o invólucro do Veículo Lançador de Satélites (VLS) desenvolvido no CTA. A órbita será equatorial circular a ~ 750 km de altitude. O principal objetivo científico da missão é realizar um monitoramento contínuo de uma ampla região contendo o Centro Galáctico e suas vizinhanças. Isso proporcionará pela primeira vez um estudo detalhado de fontes transientes de raios-X em todas as suas fases, além de estudos de microquasares, pulsares de acréscimo, buracos negros estelares, estrelas de nêutrons, restos de supernovas, núcleos ativos de galáxias e "bursts" de raios-gama. O instrumento possibilitará um estudo aprofundado da física relacionada aos processos de acréscimo, uma área extremamente importante em astrofísica moderna. O satélite deverá ser lançado entre 2005 e 2007 na base de Alcântara.

8.4 CONCLUSÃO

Os pesquisadores da DAS têm contribuído bastante para o avanço da Astrofísica em termos mundiais. Várias descobertas foram feitas graças às pesquisas realizadas no INPE. Essas contribuições incluem todas as áreas de pesquisa citadas acima. Por exemplo, em rádio e microondas foram descobertas estruturas peculiares presentes na



emissão rádio do Sol, foram obtidos mapas da emissão da nossa galáxia que mostram características novas (na figura ao lado é mostrado um mapa em 1,465 GHz do centro da nossa galáxia feito a partir de dados coletados com o telescópio GEM em Cachoeira



Paulista, SP); foram realizadas observações da distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo em microondas (figura ao lado), revelando novas características que são fundamentais para a Cosmologia, e foram desenvolvidos vários sistemas que possibilitarão a obtenção de dados de melhor qualidade.

Em óptica e no infravermelho próximo foram adquiridas novas informações sobre sistemas binários com discos de acréscimo e contribuições significativas foram realizadas no campo de formação de galáxias. Estão também em andamento programas de estudo de objetos jovens nas regiões de formação de estrelas.

Em termos de avanços na área de instrumentação, vários sistemas foram desenvolvidos em todas os campos de atuação dos pesquisadores do INPE: conquistou-se o domínio da produção de componentes para receptores de rádio e microondas, foram realizados projetos ópticos de precisão, desenvolvidas técnicas de imageamento em óptica, raios X e gama, projetados e construídos sistemas automáticos de controle de plataformas espaciais, com o desenvolvimento de um sensor estelar, entre outros. As pesquisas em instrumentação astronômica realizadas pelo INPE são responsáveis pela quase totalidade da produção nacional na área.

As pesquisas desenvolvidas pelos pesquisadores da DAS são publicadas nos melhores periódicos técnicos e científicos do mundo, que possuem os mais rigorosos sistemas de avaliação da qualidade, importância e originalidade dos trabalhos a eles submetidos. Esses trabalhos também são apresentados nas principais reuniões técnico-científicas realizadas no Brasil e no exterior. As pesquisas realizadas pela DAS contribuem também para a formação de pessoas altamente qualificadas que são incorporadas aos vários segmentos produtivos brasileiros, seja da área técnico-científica ou de áreas correlatas, o que garante um retorno altamente importante para a sociedade brasileira.

FORMAÇÃO DE ESTRELAS

José Williams Vilas-Boas

(DAS-INPE)

Notas: A capa mostra a imagem de um jato de gás criado por uma estrela de pequena massa. A interação do jato com as nuvens vizinhas (manchas vermelhas na borda dos jatos) cria uma região denominada objeto Herbig-Haro (HH)

---

e-mail: jboas@das.inpe.br

1 – INTRODUÇÃO

As tentativas mais antigas para explicar o que poderia ser uma estrela, datam de antes de Cristo. Como em outras áreas do conhecimento, a contribuição dos filósofos antigos para o entendimento do universo não poderia deixar de ser mencionada mesmo em relação a esse problema tão específico que é o nascimento de uma estrela. Abaixo seguem as idéias de alguns desses pensadores, as quais exibem uma profunda relação entre suas experiências com o mundo palpável e a suas capacidades de transcendência. Merece destaque o pensamento de Anaximandro (610 a.c.) segundo o qual "***O Sol e a Lua são anéis de fogo circundados pelo ar***" e de seu discípulo Anaximenes que propunha que "O ar é a substância básica da qual se originaram todas as coisas". Proposições apoiadas em conceitos mais abstratos também foram apresentadas, dentre as quais se destaca a proposta de Heráclito de que o Universo se equilibrava entre duas forças e que o fogo tinha primazia como agente de mudanças. Ele afirmava que o "Os corpos celestes são taças contendo fogo". Outras propostas, invocando a idéia de um criador, foi apresentada por Anáxagora (476 a.c.) e sugeria que "No princípio o Universo era uma mistura uniforme sem movimento. A "mente" entrou em ação e fez com que todo o sistema girasse; no vórtice resultante a matéria fria, densa e escura ficou no centro, dando origem à Terra, enquanto toda a matéria quente, seca e rarefeita era expulsa. O Sol, e a Lua foram arrancados da Terra e aquecidos por fricção enquanto giravam no redemoinho de matéria". Ainda antes de Cristo, Empedocles tentou interpretar o Universo como sendo composto dos elementos básicos do mundo (terra, ar, água e fogo) mais uma forças de atração (***amor***) e uma força de repulsão (***ódio***).

Antes de partir para as idéias que surgiram durante o Renascimento, após um longo período de estagnação do pensamento humano sobre o universo, vale a pena mencionar o pensamento do chinês Chi Meng (25 a 250 d.c.), segundo o qual "O céu era vazio e sem substância...não tendo fronteiras. O Sol e a Lua e as estrelas flutuavam no espaço". Essa é uma concepção bastante avançada do Universo e uma das ultimas de que se tem conhecimento após a humanidade mergulhar na Idade Média. Mesmo assim ela, como algumas outras, não discute a natureza das estrelas.

Finalmente, **Laplace** (1749-1827) propôs que o Sistema Solar nasceu de uma nuvem de gás primitiva em rotação (Nebulosa Solar). Esse modelo estabeleceu a relação

definitiva, comprovada posteriormente, entre o nascimento de uma estrela e uma nuvem de gás progenitora. Devido à similaridade entre as proposições, vale a pena mencionar o pensamento dos filósofos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes (~600 a.c.) segundo os quais "A Terra e todo corpo material se formaram da condensação de uma massa de ar giratória".

Dessa forma, surge a seguinte questão*:*

***Se as estrelas se formaram de uma nuvem progenitora, onde estão essas nuvens ou o que restou delas* ?**

***Todas as estrelas já estão formadas ou ainda existem estrelas se formando* ?**

2– ONDE NASCEM AS ESTRELAS ?

Parece simples a idéia de Laplace de que uma estrela tem como progenitora uma nuvem de gás. Hoje essa idéia é bem aceita mas para que isso acontecesse houve uma discussão relacionada com a existência dessas nuvens, que se arrastou por centenas de anos. Embora fosse fácil ver as estrelas devido a seus brilhos intensos, não era fácil observar as nuvens de gás e provar que as estrelas nasciam dentro delas.

A primeira observação direta dessas nuvens foram feita por John Hartman em 1904. Ele observou linhas espectrais na direção de muitas estrelas as quais não pareciam se originarem nas estrelas. Apesar dessa descoberta sugerir a existência de um gás no espaço interestelar, somente 18 anos mais tarde é que a comunidade científica aceitou a hipótese de que essas emissões poderiam ser geradas em uma nuvem de gás localizada na vizinhança das estrelas. Descartavam totalmente a hipótese de que essa linhas poderia ter sido gerada em uma nuvem de gás localizada entre o sistema solar e as estrelas que estavam sendo observadas. Apenas no início da década de 60 é que essa questão foi definitivamente resolvida. Nessa época, vários átomos e moléculas simples (H, H^+, Na, Ca, CH, CH^+, e CN) tinham sido observados no espaço entre as estrelas, consolidando definitivamente a hipótese de que as nuvens interestelares realmente existiam. Dentre essas substâncias, as observações de Hidrogênio mostraram que não só existiam nuvens interestelares, como também um gás tênue preenchendo quase toda a Galáxia.

Com esse resultado, a comunidade científica não tinha com duvidar da existência dessas

nuvens. Mesmo assim, ainda argumentavam que elas não poderiam ser densas o suficiente para conter moléculas complexas poli-atômicas. Essa hipótese também foi descartada ainda no final da década de 60, quando cientistas da universidade de Berkley, California, observaram emissões das moléculas de água (H_2O) e amônia (NH_3) em nuvens de gás localizadas na direção do centro de nossa Galáxia, provando assim que nessas nuvens existiam molécula poliatômicas. Finalmente, foi estabelecido que as nuvens interestelares realmente existiam.

Com o grande progresso tecnológico da microeletrônica a partir da década de 60, ocorreu uma evolução considerável no conhecimento das nuvens moleculares. Para se ter uma idéia desse progresso, da década de 70 até os dias de hoje, foram descobertas mais de 110 moléculas nessas nuvens interestelares, algumas muito simples contendo 2 átomos, até aquelas mais complexas contendo mais de 15 átomos (Tabela I). Moléculas ainda maiores foram descobertas recentemente sob a forma de grãos sólidos contendo várias dezenas de átomos, denominadas Hidrocarbonetos Poli-Aromáticos (HPA).

Para que algumas dessas moléculas sejam formadas, são necessárias regiões com densidades muito altas ($10^{6..7}$ cm^{-3}), indicando que essas nuvens não são objetos de densidade homogênea.

Agora, conhecendo com mais detalhe a constituição das nuvens interestelares, pode-se retornar às hipóteses de Laplace e dos pré-socráticos Anaximandro e Anaximenes, e procurar em nossa Galáxia as nuvens moleculares para verificar se as estrelas realmente nascem dentro delas e como se dá esse processo.

Tabela I - MOLÉCULAS INTERESTELARES E

CIRCUNSTELARES IDENTIFICADAS

H_2(IV)	**CO**	NH_3	CS	NaCl*
HCl	SiO	SiH_4* (IV)	SiS	AlCl*
H_2O	SO_2	C_2 (IV)	H_2S	KCl
N_2O	OCS	CH_4	PN	AlF*
HF				
Nitrilos e derivados de Acetileno.				
C_3 (IV, UV)	HCN	CH_3CN	HCN	$C2H_4$ (IV)
C_5 (IV)	HC_3N	CH_3C_3N	**HNCO**	C_2H_2 (IV)
C_3O	HC_5N	CH_3C_5N	HNCS	
C_3S	HC_7N	CH_3C_2H	HNCCC	
	$HC_{11}N$	CH_3CH2CN	HCCNC	
	HC_2CHO	CH_3CHCN		
Aldeídos, Álcool, Esteres, Acetonas, Amidos e moléculas relacionadas.				
H_2CO	**CH_3OH**	**HCOOH**	CH_2NH	CH_2CC
H_2CS	**CH_3CH_2OH**	$HCOOCH_3$	CH_2NH_2	CH_2CCC
CH_3CHO	CH_3SH	$(CH_3)_2O$	NH2CN	
NH_2CHO	$(CH_3)_2CO$	H_2CCO	CH_3COOH	
Moléculas Cíclicas				
C_3H_2	SiC_2	c-C_3H	CH_2OCH_2	
Ions Moleculares				
CH^+ (VIS)	HCO^+	$HCNH^+$	H_3O^+	HN_2^+
HCS^+	$HOCO^+$	HC_3NH^+	HOC^+	H_3^+ (IV)
CO^+	H_2COH^+	SO^+		
Radicais				
OH	C_2H	CN	C_2O	C_2S
CH	C_3H	C_3N	NO	NS
CH_2	C_4H	HCCN*	SO	SiC*
NH (UV)	C_5H	CH_2CN	HCO	SiN*
NH_2	C_6H	CH_2N	MgNC	CP*
HNO	C_7H	NaCN	MgCN	
C_6H_2	C_8H	C_5N		

Notas. O (*) significa que a substância química foi observada no envoltório de gás de uma estrela. IV, UV e VIS significa que essas substâncias foram observadas através de suas emissões no InfraVermelho, UltraVioleta e VISível. Todas as outras foram observadas através de suas emissões em ondas de rádio. Em negrito estão indicadas algumas moléculas observadas em gelos.

3– ONDE ESTÃO AS NUVENS MOLECULARES.

Dentre as várias moléculas listadas na tabela I, o monóxido de carbono (CO) foi uma das mais utilizadas para se estudar as nuvens moleculares distribuídas em nossa galáxia. Essa molécula é importante porque é muito abundante nas nuvens de gás e emite radiação em regiões de baixíssimas temperaturas (~ 50 K ou –223 ^{0}C) com densidades típicas das nuvens interestelares ($\geq 10^{2}$ cm^{-3}). Embora a densidade dessas nuvens seja muito baixa, se comparada à densidade da atmosfera na superfície da Terra ($>10^{18}$ cm^{-3}), ela é alta se comparada com muitas regiões de nossa galáxia, onde a densidade é inferior a uma partícula por centímetro cúbico.

A Figura 1 mostra a representação espacial da molécula de CO. Da mesma forma que os elétrons, toda vez que uma molécula salta de um nível superior de energia para um nível inferior ela emite radiação. O pulo da molécula de CO do segundo para o primeiro nível de energia, gera radiação em comprimentos de onda de rádio, que tem a característica de se propagar nos meios mais variados sem sofrer muita interferência.

Na Figura 2 é mostrada a distribuição das nuvens moleculares na nossa galáxia como visto do Sistema Solar. Essa nuvens podem ser subdivididas em dois grandes grupos, que recebem o nome de **nuvens moleculares gigantes** e **nuvens escuras**. As nuvens moleculares gigantes tem massas maiores do que 10 milhões de massas solares e as nuvens escuras têm massas da ordem de até mil massas solares. Essas nuvens menores recebem essa denominação porque quando observadas em comprimentos de onda do visível, aparecem na Via Láctea como manchas escuras. Elas são escuras porque são nuvens próximas do Sistema Solar (distância típicas menores que 1200 anos-luz) e absorvem a radiação das estrelas que estão por trás delas. Os primeiros relatos científicos sobre a existência dessas nuvens foram escritos por William Hershel em 1780. No entanto, a sua hipótese para explicar as manchas escuras contra o fundo brilhante da Via Láctea, sugeria que se estava observando através de buracos na Galáxia.

Um bom exemplo desse efeito é a nuvem escura conhecida como Saco de Carvão, que pode ser observada em uma noite de céu claro ao lado do Cruzeiro do Sul. Diversas nuvens escuras podem ser vistas ao longo da Via Láctea em uma noite de céu limpo e

sem Lua.

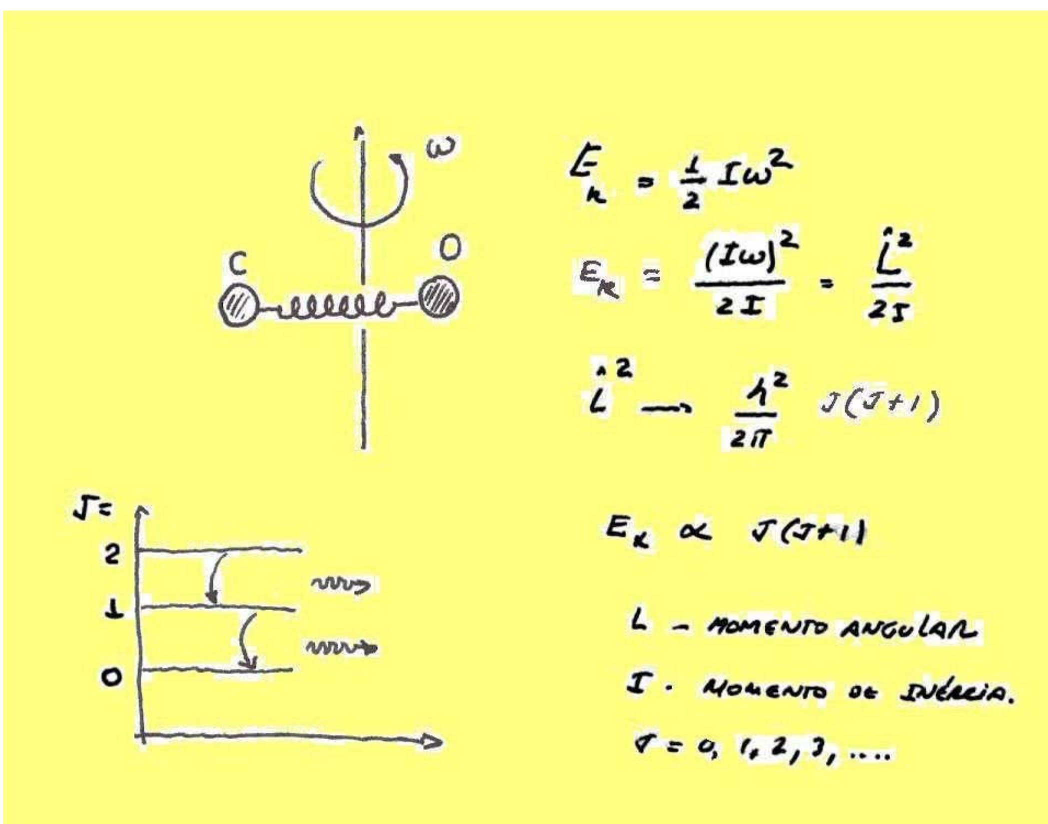


FIGURA 1 – Representação espacial da molécula de CO

Um grande número de nuvens moleculares foram identificadas em nossa galáxia. Devido à sua grande variedade de formas (circulares, irregulares, filamentares etc), localização na Galáxia, temperaturas e densidades, elas têm sido classificadas em vários tipos diferentes que se distribuem entre as duas classes de nuvens definidas anteriormente.

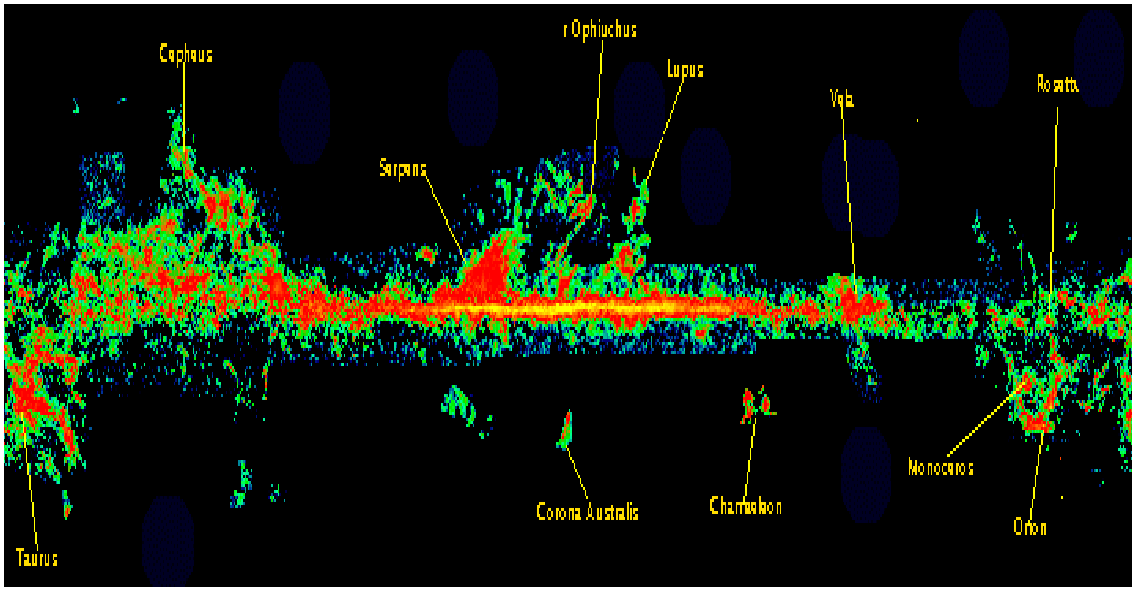


FIGURA 2 – Distribuição espacial das nuvens moleculares na Galáxia, determinada a partir de observações de monóxido de Carbono (CO)

Um aspecto interessante é que apenas as nuvens moleculares gigantes formam estrelas de grande massa. As nuvens escuras, embora tenham massa até 100 vezes maiores do que as estrelas gigantes tipo O e B, não mostram qualquer evidência de que estrelas como essas estejam se formando em seu interior. Elas formam apenas estrelas de pequena massa.

Em nossa galáxia, as nuvens moleculares gigantes estão praticamente distribuídas em seus braços, razão pela qual a maioria das estrelas de grandes massas também estão nos braços.

4 – COMO NASCEM AS ESTRELAS ?

Apesar de se ter disponível, já no início da década de 80, uma grande quantidade de informação sobre as nuvens interestelares, e também terem sido observadas centenas de

estrelas O e B jovens embebidas em nuvens moleculares, pouco se sabia dos estágios primordiais da formação das estrelas. Aqueles estágios em que as regiões mais densas de uma nuvem, por algum motivo, colapsam sobre si mesmas produzindo temperaturas tão altas em seus núcleos, capazes de desencadear as reações nucleares necessárias para o nascimento de uma estrela.

Somente em 1986 é que foi finalmente estabelecido, com base em resultados observacionais, que as estrelas nascem em condensações de altas densidades em nuvens moleculares. Devido à sua aparência, na maioria das vezes circular, essas condensações foram denominadas de Glóbulos. A primeira hipótese de que as estrelas nasciam nos glóbulos foi proposta por Baad em 1944. Três anos depois, ela foi bastante discutida por Bock e Reily (1947) e finalmente por Debai (1953), que apresentaram argumentos convincentes de que essa hipótese era verdadeira. Em homenagem a Bock, essas regiões passaram a ser denominadas Glóbulos de Bock.

Como esses glóbulos são regiões de altas densidades, eles sempre aparecem como objetos escuros quando observados em comprimentos de onda do visível. Mesmo uma estrela, que é um corpo celeste de alta temperatura e que emite muita radiação no visível, em seus estágios primordiais de formação não pode ser observada nesses comprimentos de onda. Isso porque o glóbulo progenitor absorve toda a radiação gerada pela estrela. Como mostra a figura 3, a estrela aquece o gás em sua vizinhança que por sua vez começa a emitir radiação como um corpo de baixa temperatura.

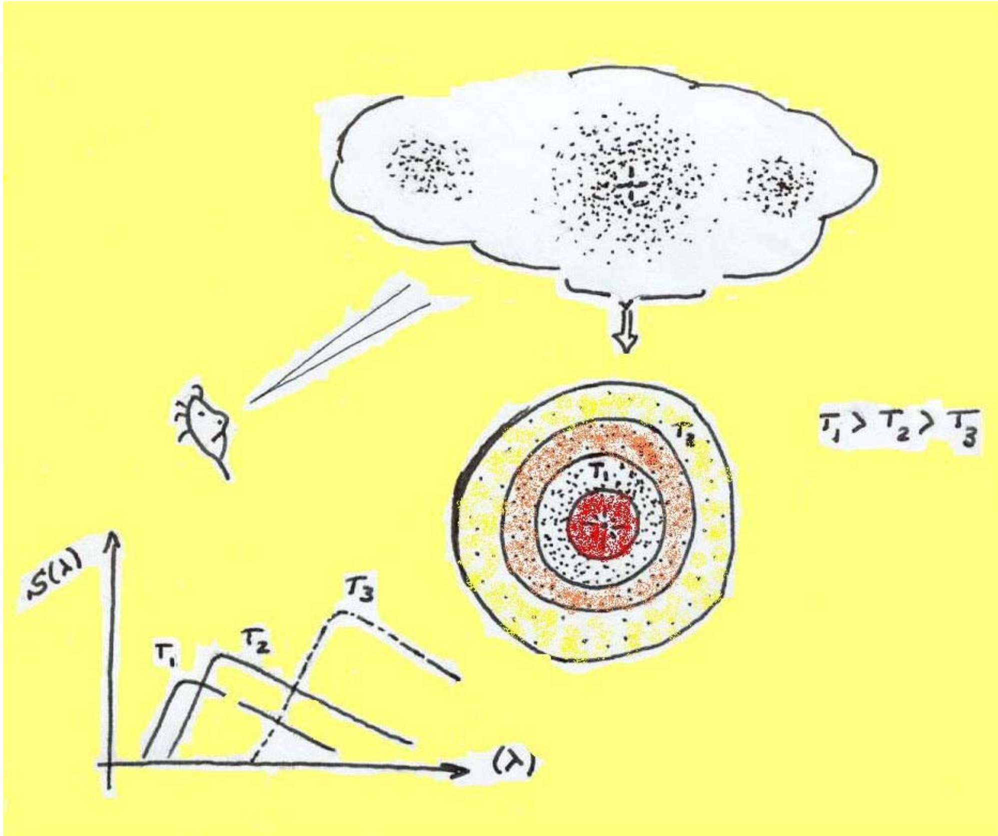


FIGURA 3 – Representação esquemática do aquecimento da região central de um glóbulo por uma estrela em seus estágios primordiais.

4.1 – EMISSÃO DE CORPOS COM BAIXAS TEMPERATURAS.

Um das principais características dos corpos com baixas temperaturas é que eles emitem radiação em comprimentos de onda grandes ou seja, baixas freqüências. Essa propriedade dos corpos é muito bem descrita pela teoria de Planck. Os corpos com temperaturas superficiais muito altas emitem quase que toda sua radiação no intervalo de energia que vai do ultravioleta ao visível. Esse é o caso das estrelas gigantes azuis jovens, cujas temperaturas na superfície são superiores a 3×10^4 K. Todavia, nos estágios primordiais de formação estelar a maior parte da emissão proveniente dos glóbulos é produzida pelo gás e a poeira aquecidos a temperaturas de 10 a 100 K. Conseqüentemente, grande parte da energia desses corpos frios é emitida em comprimentos de onda no infravermelho. Como a radiação nessas freqüências é absorvida pela atmosfera terrestre, exceto em algumas bandas muito estreitas (Ver Cap 2, Apostila), pode-se concluir que não seria fácil observar as estrelas recém-nascidas no interior dos glóbulos. É por esse motivo que as estrelas, em seus estágios primordiais de

formação, só foram identificadas no interior dos glóbulos de Bock depois das observações do Satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) em comprimentos de onda do iInfravermelho (12μm, 25μm, 60μm, 100μm).

A figura 4, mostra a imagem de um glóbulo quando observado no visível, no infravermelho distante e através da emissão de uma variedade isotópica da molécula de monóxido de carbono. Observe que os máximo da emissão de $^{12}C^{18}O$ (J=1-0) ocorre exatamente na região onde o glóbulo praticamente não emite radiação no visível. O mesmo parece ocorrer com a emissão no infravermelho distante (100μm), embora ele esteja um pouco deslocado para a borda do glóbulo no visível.

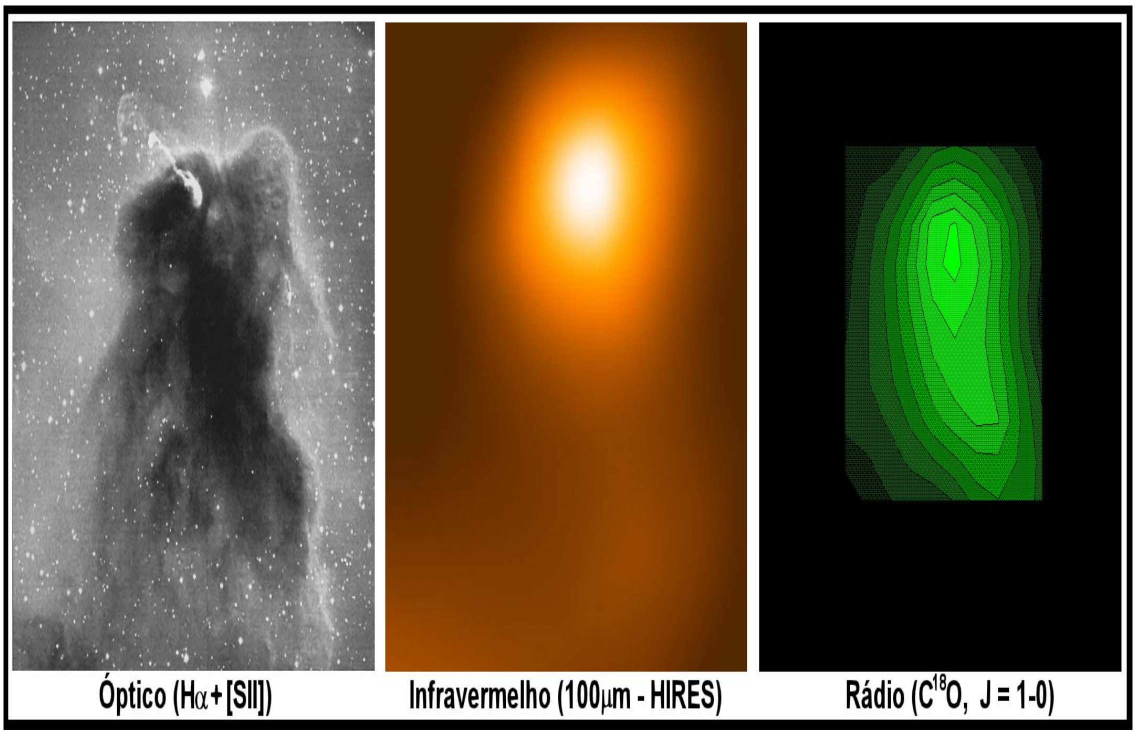


FIGURA 4 – Imagens óptica,. infravermelho e rádio do Glóbulo Cometário VG33. A imagem óptica é uma composição de imagens obtidas em Ha e SII (Reiputh, 1997) e a imagem radio é a emissão de $C^{18}O$ (Hickel e Vilas-Boas, 2001)

4.2 - O COLAPSO DOS GLÓBULOS

Com base nos argumentos apresentados, é possível elaborar um quadro simplificado para entender os mecanismos responsáveis pelo colapso dos glóbulos e finalmente

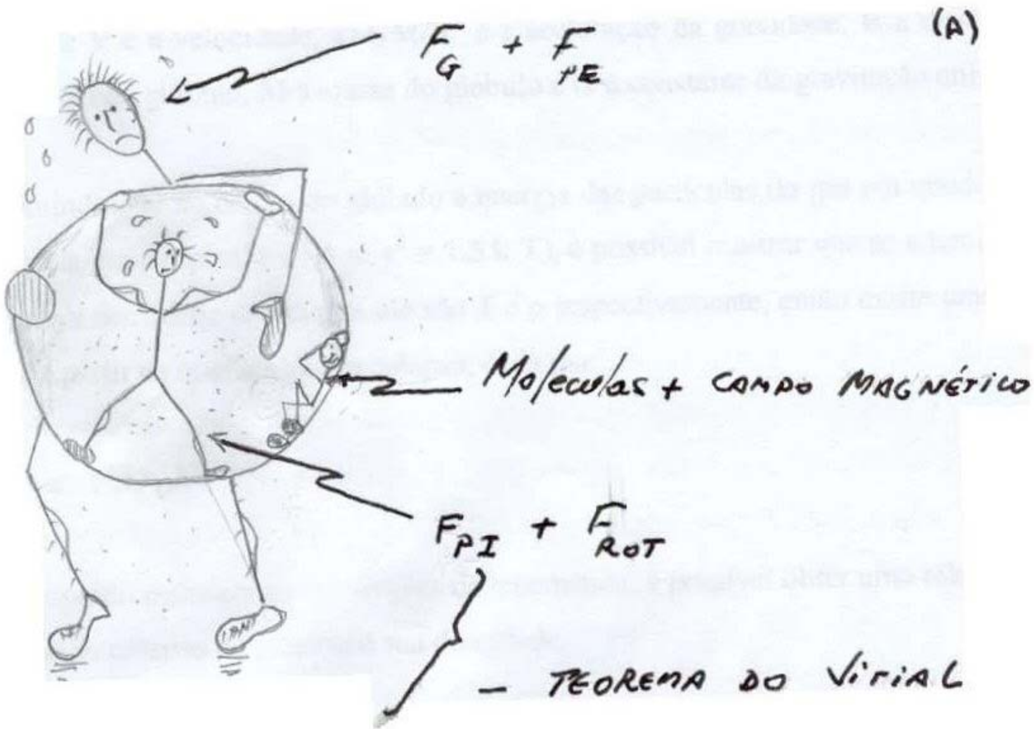
discutir quais os fatores que influenciam esse processo. Na tentativa de elaborar esse quadro e dele obter informações relevantes sobre a história do colapso, é necessário utilizar hipóteses de trabalho que simplifiquem a abordagem do problema e forneçam informações básicas sobre os mecanismos responsáveis pelo colapso.

Vamos imaginar um glóbulo esférico, com distribuição de massa uniforme, temperatura constante e destituído de movimento de rotação. Sabemos, da teoria da Gravitação Universal de Newton, que os corpos se atraem com uma força que depende de suas massas e da distância entre elas. Essa é a força que atrai os corpos para o centro da Terra e que é responsável pela queda de todos eles. Se a superfície da Terra não fosse sólida, os corpos em queda livre poderiam chegar muito mais próximo do seu centro. Logo, como base apenas nessa experiência é possível dizer, fazendo uma perfeita analogia com a Terra, que todos as partes do glóbulo estão sendo atraídas para o seu centro. Como se trata de uma objeto gasoso, todo o gás deve caminhar na direção do centro, a menos que algum outro fator impeça esse movimento. E isso realmente acontece quando as partículas em queda livre aproximam-se umas das outras a ponto de colidirem. As colisões fazem com que parte da energia cinética das partículas em queda se converta em calor, aumentando apreciavelmente a temperatura no centro do glóbulo. A conseqüência natural desse processo é o surgimento de uma força de dentro para fora, de modo semelhante ao que acontece com uma panela de pressão, podendo impedir o colapso das regiões centrais. Quanto mais gás cai para o centro do glóbulo, maior a temperatura central e maior a reação ao colapso.

Usando-se um pouco mais da nossa capacidade de abstração, seria possível incluir alguns outros elementos de nossa vida cotidiana nesse modelo. Sabemos que o glóbulo encontra-se em uma nuvem de gás mais extensa e de densidade menor. O simples fato dele estar imerso nessa nuvem, sugere que sua superfície pode sofrer a ação de uma pressão externa. Outro aspecto interessante resulta das observações de que no Sistema Solar os planetas e o próprio Sol, que é uma estrela de massa pequena, apresentam movimento de rotação. Finalmente, um aspecto mais sutil está relacionado com o fato de que a Terra, o Sol e vários outros corpos celestes, inclusive a própria galáxia, têm campos magnéticos associados.

Dessa forma, é possível ampliar o modelo anterior levando-se em consideração esses

aspectos. Uma representação esquemática está mostrada na figura 5. Em (A) é mostrada a física do problema e em (B) a sua representação matemática.



(B)

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \nabla P$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \, \vec{v}) = 0$$

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi G \rho$$

$$\nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \frac{1}{4\pi} \nabla^2 \vec{B}$$

$$\vec{f} = -\rho \nabla \Phi - \frac{1}{8\pi} \nabla B^2 + \frac{1}{4\pi} (\vec{B} . \nabla) \vec{B}$$

FIGURA 5 –Representações física (5A) e matemática (5B) da competição entre os mecanismos que podem inibir ou desencadear o colapso de um glóbulo. Em (B) estão escritas as equações da hidrodinâmica que podem descrever a evolução do colapso de um glóbulo.

Como mostra a figura, o problema consiste de uma competição entre a atração

gravitacional (F_G), o **aquecimento interno (F_{PI})**, a **pressão externa (F_{PE})**, o **campo magnético (F_B)** e o **movimento de rotação (F_{ROT}).** O que pode ser escrito matematicamente como

$$(F_G + F_{PE}) = (F_B + F_{PI} + F_{ROT})$$

Na análise que é feita a seguir, apenas para simplificar o entendimento do problema, serão desprezados os efeitos da pressão externa e da rotação. Apenas no final do texto a rotação será considerada, com ênfase no seu papel para explicar porque algumas estrelas não giram com a velocidade esperada ou giram no sentido invertido.

4.2.1 – MASSA CRÍTICA E TEMPO DE COLAPSO

Se a força gravitacional for maior do que a repulsão interna, o colapso será inevitável, resultando em uma estrela jovem. Se a repulsão interna for maior do que a atração, o glóbulo irá se desfazer. No entanto se a atração e a repulsão forem iguais o glóbulo não sofrerá qualquer alteração e permanecerá nesse estado de equilíbrio.

A partir das equações da cinemática de Newton,

$$V = Vo + a\,t$$
$$V^2 = V_o^2 + 2\,a\,R$$
$$R = V_o\,t + ½\,a\,t^2$$

onde **V** é a velocidade, $a=GM/R^2$ é a aceleração da gravidade, **R** a distância ao centro do glóbulo, **M** a massa do glóbulo e **G** a constante de gravitação universal.

e assumindo que no centro do glóbulo a energia das partículas do gás em queda livre é convertida em temperatura ($½\,m\,v^2 = 1.5\,k\,T$), é possível mostrar que se a temperatura interna e a densidade de um glóbulo são **T** e ρ respectivamente, então existe uma massa crítica a partir da qual o glóbulo colapsa, dada por

$$M_{CRIT} \propto T^{3/2} / \rho^{1/2}$$

Ainda usando essas equações simples da cinemática, é possível obter uma relação entre o tempo de colapso do glóbulo e sua densidade.

$\mathbf{t_{colapso}} \propto \rho^{-1/2}$

Esses resultados mostram que quanto maior a temperatura no centro dos glóbulos maiores serão as massas necessárias para desencadear o colapso. Outro aspecto interessante é que, tanto maiores serão as densidade centrais, quanto maiores forem as massas dos glóbulos. Logo, o colapso para formar estrelas de massas grandes (estrelas tipo O) ocorre numa escala de tempo menor do que as estrelas de massas pequenas (o nosso Sol).

Uma estimativa mais rigorosa da Massa Crítica, também denominada massa de Jeans, e do tempo de colapso pode ser feita a partir das equações da hidrodinâmica fornecidas na figura 5B. Para resolvê-la em primeira aproximação, usa-se o método das perturbações. Resultados similares aos obtidos anteriormente também são obtidos com esse procedimento bem mais rigoroso. Ele tem a vantagem de poder explorar em detalhes todo o processo do colapso, usando-se métodos computacionais.

4.2.2 – QUAL O PAPEL DO CAMPO MAGNÉTICO NO COLAPSO?

Embora os glóbulos sejam densos e absorvam praticamente toda a radiação em suas camadas externas, algumas partículas de altas energias vindas do Cosmo (raios cósmicos) conseguem penetrá-los, ionizando uma pequena quantidade de matéria. Essa matéria ionizada é suficiente para mudar apreciavelmente a história do colapso. Isso porque as partículas carregadas sofrem uma influência muito forte do campo magnético. Quando as cargas em seu movimento de colapso cruzam perpendicularmente o campo, elas tendem a arrastá-lo. Isto não acontece quando elas seguem ao longo do campo. Nessas direção, elas se movem sem sofrer qualquer interação com ele. É essa maneira diferente das partículas ionizadas interagirem com o campo magnético que acaba influenciando o quadro evolutivo do colapso. Uma situação interessante é aquela em que o campo é tão forte que ele se opõe ao movimento das partículas carregadas, inibindo completamente o colapso. Embora isso possa acontecer, o campo magnético

apresenta um comportamento muito interessante: ao longo do tempo ele tende a voltar à configuração que ele tinha antes do início do colapso. Isso faz com que, transcorrido um certo tempo (tempo de **difusão ambipolar**), o campo magnético deixe o glóbulo gradativamente, permitindo que as regiões centrais comecem a colapsar. Isto é, o núcleo do glóbulo entra em colapso primeiro e posteriormente as partes mais externas. Esse tipo de colapso cria uma região rarefeita entre o núcleo denso e a borda interna envelope de gás que continua caindo para o centro. Tudo se passa como se esse anel de rarefação estivesse se propagando de dentro para fora. Esse tipo de colapso é denominado **colapso de dentro para fora**.

O colapso que ocorre sem a ação de qualquer mecanismo externo, é denominados de ***colapso espontâneo***.

Na figura 6, é mostrada uma representação esquemática do problema. Em 6A é mostrada a nuvem molecular, o glóbulo e as linhas de campo magnético. Em 6B as linhas de campo estão distorcidas dentro dos glóbulos porque os íons que participam do colapso e se movem perpendicularmente ao campo magnético, arrastam o campo consigo. Observe que ao longo do campo o gás cai livremente, o que não acontece nas direções perpendiculares. Conseqüentemente, o que antes era uma esfera de gás se transforma em algo com a forma de disco, como mostram as figuras 6 B e C. Essa geometria também é favorecida pela rotação.

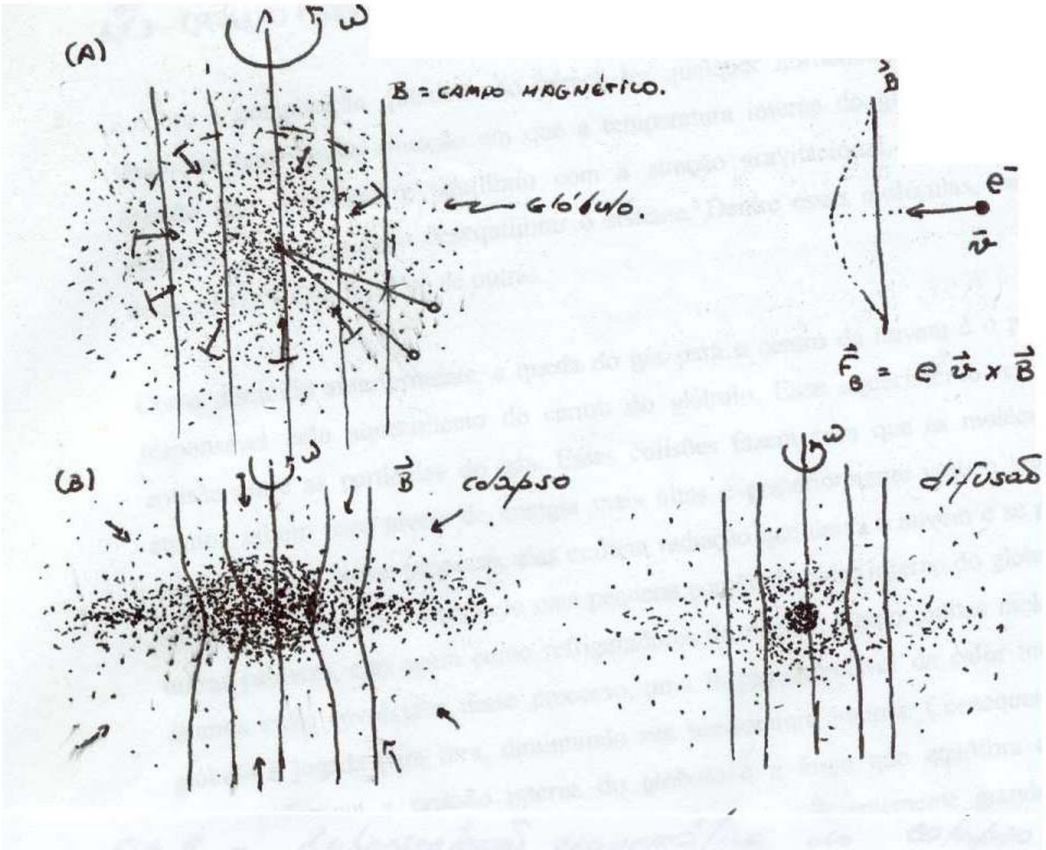


FIGURA 6 – Representação esquemática dos estágios evolutivos do colapso de um glóbulo. (A) representa o estado inicial do colapso. O glóbulo ainda é esférico e as linhas do campo magnético são paralelas. Isto é, o campo é uniforme. Em (B) o colapso evoluiu e as linhas de campo foram arrastadas pelo gás em queda livre e a geometria da nuvem tende para um disco (elipsóide oblato). Em (C) o colapso do núcleo já ocorreu e uma estrela jovem encontra-se no centro do glóbulo.

4.2.3 – QUAL O PAPEL DAS SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS ?

Embora a composição química não pareça ter qualquer influência no colapso, ela realmente tem. Numa situação em que a temperatura interna do glóbulo gera uma pressão que estabelece o equilíbrio com a atração gravitacional, a presença das moléculas e átomos pode desequilibrar o sistema. Dentre essas moléculas, merecem destaque H_2O, CO, H_2 além de outras.

Como discutido anteriormente, a queda do gás para o centro da nuvem é o principal

responsável pelo aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento resulta da colisão entre as partículas do gás. Essas colisões fazem com que as moléculas ou átomos saltem para níveis de energia mais altos e posteriormente voltem para seus estados inicias. Nesse processo, elas emitem radiação que deixa a nuvem e se propaga em todas as direções, carregando uma pequena porção do calor interno do glóbulo. Em outras palavras, elas agem como refrigeradores do núcleo. Como muitas moléculas e átomos estão envolvidos nesse processo, uma fração apreciável do calor interno do glóbulo é jogada para fora, diminuindo sua temperatura interna. Consequentemente, também diminui a pressão interna do glóbulo e a força que equilibra a atração gravitacional. Quando a diminuição dessa força é suficientemente grande, todo o glóbulo inicia um novo colapso.

O colapso resulta em um grande aquecimento do centro do glóbulo. Esse aquecimento é tal que 4 átomos de hidrogênio se fundem dando origem a um átomo de **He**. Quando isso ocorre, por definição nasce uma estrela. A principal característica desse processo de fusão é que parte da massa dos 4 átomos de **H** se transforma em energia ($E=mc^2$), sendo esse um dos principais processos de produção de energia nas estrelas (Ver Cap 4 da Apostila) .

5 – CONSEQUÊNCIAS DO NASCIMENTO DE UMA ESTRELA.

Como mencionado no item anterior, o colapso resulta em aquecimento do núcleo dos glóbulos e finalmente no nascimento de uma estrela. A principal característica de uma estrela é que ela é uma intensa fonte de radiação. Tanto mais intensa ela será quanto maior for a sua massa. Com base nessa informação, pode-se concluir que as estrelas tipo O (gigantes azuis com massas >10 Massas do Sol) são muito mais brilhantes do que estrelas como o Sol, que é uma anã tipo G. Devido às altas temperaturas de suas superfícies (>30000 C) as estrelas de grande massa produzem radiação ($>10^{48}$ fótons ionizantes) com energia suficiente para dissociar completamente uma grande quantidade de gás em torno das estrelas recém-nascidas. Como as estrelas de massa pequena, como o nosso Sol, produzem pouca radiação com essas características, elas não são capazes de ionizar o gás em sua vizinhança a ponto de criar uma grande bolha de gás ionizado. Levando-se em consideração apenas essa característica, é possível concluir que as primeiras evidências do nascimento de um "bebê" estrela varia em função de suas

massas.

5.1 – ESTRELAS MASSIVAS O E B (M≈10 MASSAS SOLARES)

Ao nascerem, as estrelas de grande massa (10 massas solares ou mais) criam em torno de si uma bolha de gás totalmente ionizado, inicialmente pequena, e que se expande continuamente criando uma onda de choque na região que delimita a bolha ionizada e o gás externo. Essa bolha pode se expandir consumindo completamente o glóbulo progenitor, podendo inclusive ionizar toda a nuvem de gás. Um aspecto interessante desse quadro evolutivo é que a frente de choque, propagando-se ao longo da nuvem, tem a propriedade de comprimir o gás que encontra em seu caminho. Se essa frente encontra um glóbulo, ela aumenta a pressão externa ($\mathbf{F_{PE}}$) do ambiente onde ele se encontra. O aumento da pressão pode desequilibrar os glóbulos induzindo a formação de novas estrelas. Esse mecanismo parece ser um dos principais responsáveis pela formação de estrelas de grandes massa e tem sido amplamente utilizado para explicar associações de estrelas de grande massa que apresentam gradientes de idades. Ele é denominado de ***Formação Induzida*** ou ***Formação Seqüencial de Estrelas***.

A figura 7 (A) mostra o "bebê" estrela e a bolha de gás ionizado que se expande na direção do disco, bem como na direção perpendicular. Observe que a direção perpendicular é a direção do campo magnético. A expansão da bolha de gás ionizado ao longo do plano do disco é mais difícil do que na direção perpendicular. Isso porque a densidade do disco é muito alta e também porque o gás ionizado tem que se mover perpendicularmente ao campo magnético. Como se discutiu anteriormente, o campo magnético se opõe ao movimento de cargas elétricas nessa direção. Esse efeito tem menor importância quando a estrela é muito brilhante e a energia injetada no gás ionizado é muito alta. Embora o disco e o campo magnético ofereçam resistência à expansão dessa bolha de alta energia, ela acaba destruindo o disco e o próprio glóbulo. E tudo isso numa escala de tempo muito curto ($<10^5$ anos). Embora essas estrelas, durante sua fase "pré-natal", estejam completamente embebidas em um "casulo" muito denso (glóbulo), elas anunciam a sua existência criando um forte jato de gás que escapa do núcleo do casulo na direção perpendicular ao disco. Uma vez que toda essa atividade pode ocorrer no período compreendido entre as "últimas semanas de gestação" e os primeiros dias de vida das estrelas, esses jatos podem ser vistos como o primeiro

“choro” do bebê estrela.

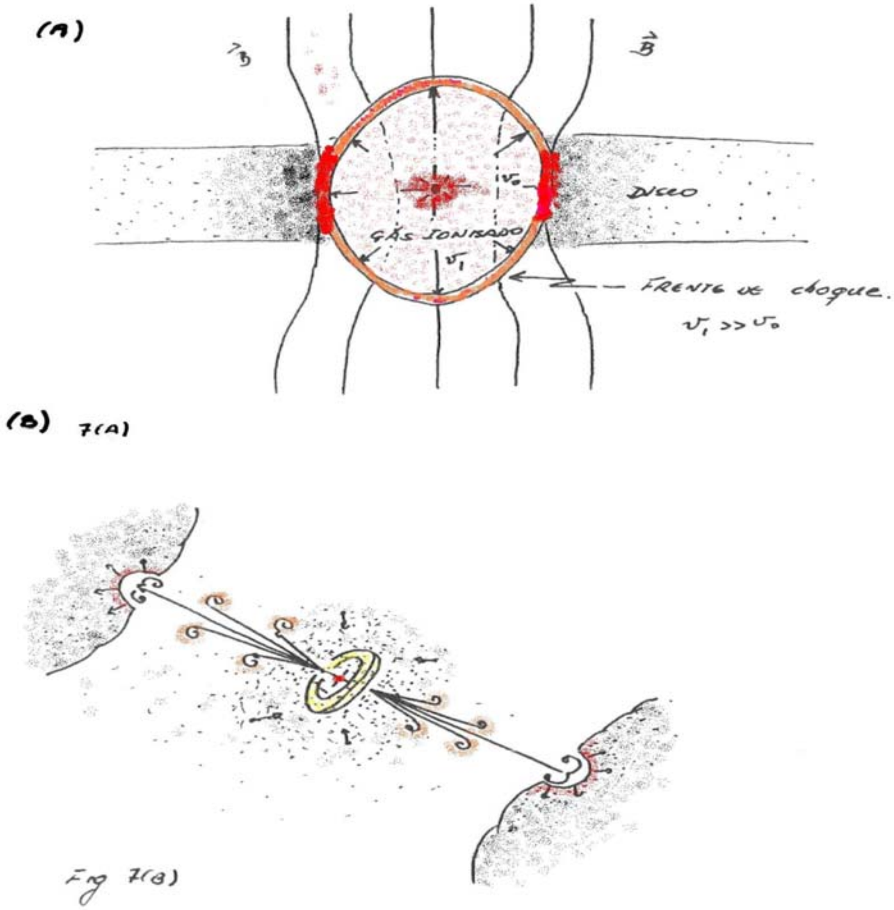


FIGURA 7 – Representação esquemática dos estágios posteriores ao nascimento das estrelas. Em (A) é mostrada a bolha de gás ionizado (região HII compacta) criada por uma estrela de grande massa (O,B) expandindo-se ao longo do disco e nas direções perpendiculares. A frente da bolha ionizada é marcada pela presença de um choque supersônico e um intenso campo de radiação ultravioleta. Em (B) é mostrada a evolução da bolha de gás aquecido que se forma em torno da estrela de massa pequena. É mostrada a interação do jato perpendicular ao disco com as nuvens moleculares vizinhas.

5.2 – ESTRELAS DE PEQUENAS MASSAS (M≈1 MASSA SOLAR)

As estrelas de pequena massa se formam de maneira similar às estrelas de grande massa. As principais diferenças no processo de formação de ambas estão relacionadas principalmente com seu estágios finais de “gestação”. Enquanto as estrelas muito brilhantes, de grande massa, nascem e podem destruir completamente o glóbulo progenitor, as estrelas de massa pequena não. Por esse motivo, os efeitos do nascimento

desse "bebê" estrela sobre o meio ficam determinados pelas características da própria estrela mais as condições impostas pelo meio em que ela se forma. Isto é, da mesma forma que uma estrela de grande massa, ela também cria uma bolha de gás aquecido que se expande em todas as direções. Todavia, no caso dessas estrelas, a expansão ao longo do disco se limita a uma certa distância da estrela central, preservando assim o disco e o ambiente externo. Na direção perpendicular, o gás aquecido de alta pressão escapa ao longo da direção do campo magnético formando um jato que vai interagir com a nuvem molecular ou o resto do glóbulo que não foi consumido nessa "gestação".

A principal característica da formação dessas estrelas é que elas preservam o disco de gás e poeira do qual se formam os sistemas planetários. É exatamente num sistema planetário como esse que se encontra a única forma de vida ***"inteligente"*** que se conhece.

Uma representação esquemática dos estágios primordiais de evolução dessas estrelas é mostrado na figura 7B.

Os estudos da atividade de formação de estrelas nas nuvens moleculares, realizados na última década, mostram que as estrelas de grande massa nascem apenas em nuvens moleculares gigantes onde também se formam estrelas de pequena massa. Esse é o caso de nuvens moleculares como Orion e NGC6334. Por outro lado, as nuvens moleculares escuras, que tem massas até mil vezes menores que as gigantes, formam apenas estrelas de pequena massa. Esse é o caso por exemplo das nuvens conhecidas como Cepheus, Taurus, Musca, Chamaeleon etc.

5.3 – ROTAÇÃO DAS NUVENS.

As observações dos glóbulos mostram que eles têm rotação muito pequena ou quase imperceptíveis. Mesmo sendo pequena, essa rotação pode ter consequência muito importante na história evolutiva de um glóbulo. Por menor que seja esse movimento no início do colapso, caso em que a rotação é originária da própria rotação galáctica, ele acaba sendo importante nos estágios finais porque o colapso conserva o momento angular. Isto é, quanto menor for o raio do glóbulo colapsando, mais rápido ele gira.
Se o glóbulo gira mais rápido à medida que o colapso prossegue, o que deveria

acontecer com o campo magnético se, de acordo com as discussões anteriores, ele é arrastado pelo gás ?

Seria de se esperar que ele também fosse arrastado pelo movimento de rotação. Como conseqüência o campo tenderia a torcer sobre si mesmo. Como o campo se opõe a esse movimento, da mesma forma que ao colapso, a torção resulta na diminuição da velocidade de rotação do gás. Esse efeito é um dos mecanismos capazes de explicar porque a rotação de estrelas recém-formadas não conserva a energia de rotação das nuvens progenitoras. Devido a esse tipo de torção do campo, pode haver uma situação extrema em que o próprio sentido de giro da estrela pode ser invertido.

Na realidade, as observações de algumas estrelas jovens com massa idêntica à do Sol (estrelas T Tauri) mostram movimento de rotação contrário à rotação da sua nuvem progenitora com energia da rotação sempre menor do que a energia de rotação inicial.

BIBLIOGRAFIA

Wynn-Williams, G. "The Fullness of Space". Cambridge University Press, 1992.

Taylor, S.R., "Solar System Evolution. A New Perspective". Cap 2. Cambridge University Press, 1992

Verschuur, G. L. "Interestellar Matters". Spring-Verlag, 1990.

Ronan, C. A. "História Ilustrada da Ciência". Jorge Zahar Editor Vols. I e II. 1991.

Proceedings of the International Conference "Star Formation 1999". Nagoya, Japan.
Obs: Material disponível via Internet.